



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas,
Oceánicas y Recursos Naturales

“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA ZOZOBRA DE UN
BUQUE ATUNERO ECUATORIANO SEGÚN LOS NUEVOS
CRITERIOS DE LA OMI”

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

DAVID ANDRES PLAZA MENDOZA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la vida. Junto a mis padres y a mis hermanos, Rafael y Desirée, que han estado apoyándome constantemente en toda mi vida. Y un agradecimiento especial a mi director José R. Marín por darme las herramientas y conocimientos para formarme profesionalmente en toda mi vida universitaria.

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a Dios sobre todas las cosas. A mis padres, Rafael y Kathya por su eterna ayuda que han llevado al lugar que estoy.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
José R. Marín L.

PROFESOR SUPERVISOR

.....
Nadia R. Muñoz A.

COORDINADOR DE LA CARRERA

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOLE realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

David Andrés Plaza Mendoza

RESUMEN

En la Segunda Generación de Criterios de Estabilidad Intacta de la Organización Marítima Internacional, OMI, tiene como objetivo la evaluación de la acción dinámica de las olas sobre el buque, que no se cubre en la versión primera. Para esto, se definen dos niveles de evaluación de la vulnerabilidad para los cuatro modos de zozobra identificados. Estos modos de falla son Pérdida esencial de estabilidad (“*Pure Loss*”), Balance Paramétrico (“*Parametric Roll*”), Navegación sobre la cresta de la ola (“*Surf-Riding*”) y Buque Apagado (“*Dead Ship*”). En este trabajo se evalúa según los nuevos criterios en desarrollo de la OMI, la estabilidad intacta de un buque atunero ecuatoriano de 45 metros de eslora que zozobró alrededor de las Islas Galápagos, en dos condiciones cargas de navegación.

Luego de la evaluación, se encontró que el buque atunero no es proclive a la zozobra en el primer nivel de vulnerabilidad, en todos los modos de zozobra excepto el de Navegación sobre la cresta de la ola. El valor de altura metacéntrica transversal de la embarcación con sus bodegas parcial ó totalmente llenas, reduce la posibilidad de zozobra en el primer nivel de Pérdida Esencial de Estabilidad y Balance Paramétrico. Además, la embarcación no es proclive a la zozobra por Buque Apagado, debido a que su periodo de rolido es menor a 20 segundos y por ende se evalúa de la misma manera que el Criterio Meteorológico comúnmente aplicado.

Debido a que la embarcación a Nivel I es vulnerable en Navegación sobre la cresta de la ola, el criterio de la OMI obliga a evaluar el siguiente nivel en ese modo de falla. En

este cálculo la Resistencia al avance y el coeficiente de empuje son interpolados con polinomios de quinto y segundo grado respectivamente. Para estimar los parámetros propulsivos se aplicó las formulaciones de Holtrop. En el Nivel II de vulnerabilidad se realiza la evaluación para diferentes velocidades de operación del buque, encontrándose que el buque atunero es proclive a la zozobra a partir de 12 nudos de velocidad de operación en Navegación sobre la cresta de ola.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| AGRADECIMIENTOS..... | ii |
| DEDICATORIA | iii |
| TRIBUNAL DE EVALUACIÓN | iv |
| RESUMEN..... | 6 |
| ÍNDICE GENERAL | 8 |
| INTRODUCCIÓN..... | 14 |
| CAPÍTULO 1..... | 18 |
| 1. CONCEPTOS GENERALES | 18 |
| 1.1 Segunda Generación de criterios de Estabilidad | 18 |
| 1.2 Modos de Zozobra | 22 |
| 1.3 Flota Pesquera Ecuatoriana..... | 28 |
| 1.4 Características Principales del Buque Seleccionado | 31 |
| CAPÍTULO 2..... | 40 |
| 2. EVALUACIÓN DEL NIVEL I DE VULNERABILIDAD DEL BUQUE ATUNERO..... | 40 |
| 2.1 Pérdida Esencial de Estabilidad | 42 |
| 2.2 Balance Paramétrico | 50 |
| 2.3 Navegación sobre la Cresta de la ola/guiñada súbita..... | 57 |
| 2.4 Buque Apagado | 59 |
| CAPÍTULO 3..... | 66 |
| 3. NIVEL II DE NAVEGACIÓN SOBRE LA CRESTA DE LA OLA/GUIÑADA SÚBITA | 66 |
| 3.1 Reglamentación del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola | 68 |
| 3.2 Implementación del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola | 73 |
| 3.3 Resultados del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola | 84 |
| CONCLUSIONES | 88 |
| RECOMENDACIONES..... | 89 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 90 |
| ANEXOS | 92 |
| ANEXO 1 | 93 |

| | |
|---|----|
| EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD PARA LA SEGUNDA CONDICIÓN DE CARGA..... | 93 |
| ANEXO 2..... | 97 |
| VULNERABILIDAD DEL NIVEL I DEL MODO DE FALLA DE BALANCE PARAMÉTRICO | 97 |
| ANEXO 3..... | 98 |
| CÁLCULO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE ROTACIÓN PARA EL NIVEL II DE NAVEGACIÓN SOBRE LA CRESTA DE LA OLA..... | 98 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Diferencia general entre Primera y Segunda Generación de Estabilidad | 19 |
| Figura 1.2 Diagrama de Flujo de la Segunda Generación [8]..... | 21 |
| Figura 1.3 Evaluación de la segunda generación de estabilidad intacta para el presente proyecto..... | 22 |
| Figura 1.4 Manifestación Física de Pérdida eficaz de Estabilidad [8] | 24 |
| Figura 1.5 Desarrollo de Balance Paramétrico [12]..... | 25 |
| Figura 1.6 Secuencia dinámica de Guiñada Súbita [13]..... | 26 |
| Figura 1.7 Fuerzas actuantes en el buque debido a olas. [12] | 26 |
| Figura 1.8 Escenario proclive para la modalidad de buque apagado [12] | 27 |
| Figura 1.9 Rango de Eslora de buques atuneros | 29 |
| Figura 1.10 Rango de Eslora de buques sardineros | 29 |
| Figura 1.11 Plano de líneas de forma del buque seleccionado [15] | 33 |
| Figura 1.12 Distribución general del buque seleccionado [15] | 34 |
| Figura 1.13 Resistencia al avance del buque pesquero..... | 39 |
| Figura 2.1 Salida de Puerto: GM_T en Olas vs Posición de la cresta de la ola..... | 41 |
| Figura 2.2 Llegada a Puerto: GM_T en Olas vs Posición de la cresta de la ola | 41 |
| Figura 2.3 Diagrama de flujo del Nivel I de Vulnerabilidad de Pérdida esencial de Estabilidad | 42 |
| Figura 2.4 Inercia de plano de flotación en función del calado | 47 |
| Figura 2.5 GM_T en olas Vs Posición de la cresta para Pérdida Esencial de Estabilidad | 49 |
| Figura 2.6 Altura Metacéntrica mínima VS Altura de Ola | 50 |
| Figura 2.7 Diagrama de flujo del Nivel I de Vulnerabilidad de Balance Paramétrico | 51 |
| Figura 2.8 GM_T en olas Vs Posición de la cresta para Balance Paramétrico..... | 56 |
| Figura 2.9 Cambio de Altura Metacéntrica por GM_T de aguas tranquilas VS Altura de Ola..... | 57 |
| Figura 2.10 Evaluación del número de Froude en buques pesqueros Ecuatorianos | 58 |
| Figura 2.11 Diagrama de flujo del Nivel I de Vulnerabilidad de Buque Apagado | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.12 Criterio Meteorológico [9] | 61 |
| Figura 2.13 Coeficientes de ajuste de curva de brazos adrizantes (GZ) | 63 |
| Figura 2.14 Criterio Meteorológico para la condición Salida de Puerto | 65 |
| Figura 2.15 Criterio Meteorológico para la condición Llegada a Puerto | 65 |
| Figura 3.1 Evaluación del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la ola para las dos condiciones de carga | 67 |
| Figura 3.2 Polinomio de interpolación de 5to orden de la Resistencia al avance | 75 |
| Figura 3.3 Polinomio de interpolación de 2do orden del coeficiente de empuje (KT) | 76 |
| Figura 3.4 Gráfica de la ecuación 3.3 para encontrar n_{cr} | 78 |
| Figura 3.5 Intersección de Empuje y Resistencia al avance del buque | 79 |
| Figura 3.6 Diagrama de flujo del cálculo del coeficiente $C2_{ij}$ | 80 |
| Figura 3.7 Coeficiente $C2_{ij}$ para las combinaciones de r_i y s_j | 81 |
| Figura 3.8 Ponderación de ocurrencias de olas | 82 |
| Figura 3.9 Cálculo de C de Navegación sobre la cresta de la Ola | 83 |
| Figura 3.10 Coeficiente $C2_{ij}$ a 12 nudos de velocidad de operación..... | 85 |
| Figura 3.11 Coeficiente $C2_{ij}$ a 10 nudos de velocidad de operación..... | 85 |
| Figura 3.12 Resumen de Resultados del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola..... | 86 |
| Figura 3.13 Resumen de resultado de evaluación de la Segunda Generación de Estabilidad de un buque atunero | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Enfoque de los Niveles de Evaluación [11] | 20 |
| Tabla 2 Características principales de la nave seleccionada [15] | 31 |
| Tabla 3 Datos propulsivos del buque pesquero estudiado | 35 |
| Tabla 4 Condición de carga 1, Salida de Puerto [6] | 36 |
| Tabla 5 Condición de carga 2, Llegada a Puerto [6] | 37 |
| Tabla 6. Cálculos hidrostáticas de ambas situaciones de carga. | 38 |
| Tabla 7 Datos de Ingreso 1 para el Nivel I de Pérdida Esencial de Estabilidad..... | 45 |
| Tabla 8 Datos de Ingreso 2 para el Nivel I de Pérdida Esencial de Estabilidad..... | 46 |
| Tabla 9 Resultados de Pérdida Esencial de Estabilidad (Nivel I: Salida de Puerto) | 48 |
| Tabla 10 Datos de Ingreso 1 para el Nivel I de Balance Paramétrico..... | 53 |
| Tabla 11 Datos de Ingreso 2 para el Nivel I de Balance Paramétrico..... | 54 |
| Tabla 12 Resultados de Balance Paramétrico (Nivel I: Salida de Puerto) | 55 |
| Tabla 13 Evaluación del número de Froude de la embarcación..... | 58 |
| Tabla 14 Valor del Factor s , en función del periodo de rolido [12]..... | 60 |
| Tabla 15 Datos de Ingreso para el Nivel I de Buque Apagado..... | 62 |
| Tabla 16 Resultados de Buque Apagado (Nivel I: Salida de Puerto)..... | 64 |
| Tabla 17 Ocurrencia de casos de oleaje..... | 72 |
| Tabla 18 Datos de ingreso para el Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola..... | 74 |
| Tabla 19 Valores de área sumergida para secciones a lo largo del buque | 77 |
| Tabla 20 Evaluación final del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la ola de Salida de Puerto..... | 82 |
| Tabla 21 Resultado de Navegación sobre la cresta de la Ola (Nivel II: Salida de Puerto) | 84 |
| Tabla 22 Evaluación Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola..... | 86 |
| Tabla 23 Evaluación de Pérdida Esencial de Estabilidad (Nivel I: Llegada a Puerto).... | 94 |
| Tabla 24 Evaluación de Balance Paramétrico (Nivel I: Llegada a Puerto)..... | 95 |
| Tabla 25 Evaluación de Buque Apagado (Nivel I: Llegada a Puerto) | 96 |

| | |
|--|----|
| Tabla 26 Evaluación de Navegación sobre la cresta de la Ola (Nivel II: Llegada de Puerto)..... | 96 |
|--|----|

INTRODUCCIÓN

En nuestro país se presentan casos de buques pesqueros que zozobran a pesar de que cumplen de manera satisfactoria los requerimientos de estabilidad intacta actuales. Tal es el caso del buque pesquero que en el año 2014 “fue hundido por dos olas gigantes a 180 millas de las Islas Galápagos” involucrando irreparables pérdidas humanas [1]. Pasado dos años, otra nave de pesca se vio afectada “presuntamente por un fuerte temporal a 220 millas de Manta” [2]. Ahora bien, un buque sólo puede navegar en aguas ecuatorianas con condiciones aceptables de estabilidad, pero debe mencionarse que dichas exigencias no consideran la acción dinámica del oleaje sobre la nave.

La Organización Marítima Internacional (OMI) considera en la Segunda Generación de Estabilidad Intacta [3], acciones dinámicas de las olas sobre el buque, que pueden conducir a cuatro modos de falla. La “Pérdida Esencial de Estabilidad” y el “Balance Paramétrico” se manifiestan con una reducción de altura metacéntrica (GM) y la resonancia al rolido respectivamente, ambos producidos en navegación en olas de proa y popa. La “Navegación sobre la Cresta de la ola/caída” es un fenómeno que conduce a giros violentos del buque a pesar de mantener un curso fijo de navegación. Por último, la situación de “Buque Apagado” está relacionada con la respuesta del buque con olas y viento de costado cuando la nave ha perdido la propulsión. La evaluación de la OMI para cada modo de falla tiene niveles de evaluación progresivas, en donde se satisface alguno no será necesario llegar a evaluar el siguiente.

El Ecuador cuenta con una numerosa flota de buques pesqueros y por su seguridad es justificable realizar un estudio de la Segunda Generación de Estabilidad Intacta aun cuando no se haya implementado formalmente. En la flota, un grupo de buques con mayor eslora son destinados para la pesca de atún (Atuneros), mientras que los de menor eslora son usados para la pesca de sardina (Sardineros). Todos los buques deben cumplir con los actuales criterios de estabilidad intacta de origen estático para su operación. En Ecuador todavía no se realiza una evaluación de la flota según la segunda generación, debido a que no es una regla adoptada por la misma autoridad

marítima, pero debería empezar a considerarse en procesos de diseño de nuevas embarcaciones.

Existen algunos estudios sobre la aplicabilidad de los criterios de la Segunda Generación de Estabilidad Intacta en buques pesqueros. En España se analizó la aplicabilidad de estos criterios a excepción de la navegación sobre la Cresta de la ola/caída para la flota de dicho país [4] concluyendo en la aprobación del nivel 1 de los criterios y discrepando en el nivel 2 en modalidad de balance paramétrico y buque apagado. En el mismo país y con una flota similar de buques pesqueros, se analizó el uso de los criterios de pérdida de propulsión [5] concluyendo en la necesidad de reglamentación para buques de pequeña eslora. En Ecuador se realizaron simulaciones numéricas de dos modos de zozobra para un mismo buque atunero ecuatoriano en [6] y [7] determinando la no posibilidad de balance paramétrico en olas irregulares pero si en la navegación sobre la cresta de la ola en mar regular. En este trabajo, se busca evaluar la vulnerabilidad para los cuatro modos de zozobra en un buque atunero ecuatoriano aplicando la versión actual de los criterios de estabilidad de la Segunda Generación en desarrollo.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la vulnerabilidad de un barco pesquero ecuatoriano según la Segunda Generación de criterios de Estabilidad Intacta de la Organización Marítima Internacional

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un programa de computación que permita evaluar la vulnerabilidad de los cuatro modos de zozobra.

HIPÓTESIS

El buque atunero Ecuatoriano en estudio es vulnerable a la zozobra de acuerdo a la Segunda Generación de Criterios de Estabilidad de la OMI actualmente en desarrollo.

BENEFICIOS

En Ecuador no se difundido la reglamentación de la Segunda Generación de Criterios de Estabilidad de la OMI. En un futuro cercano, se abrirá un amplio campo de diseño conceptual de embarcaciones, todo con el fin de disminuir las posibilidades de siniestros de estabilidad por navegación en mar irregular.

METODOLOGÍA

- Definir los modos de zozobra que tiene la segunda generación de criterios de estabilidad intacta.
- Seleccionar el buque atunero atunero y establecer las condiciones de carga a estudiarse.
- Evaluar el Nivel I de Vulnerabilidad del buque atunero para los cuatro modos de falla
- Evaluar el Nivel II de Vulnerabilidad para los modos de falla que no aprobaron el Nivel I.

CAPÍTULO 1

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1 Segunda Generación de criterios de Estabilidad

Uno de los requerimientos fundamentales de navegación para cualquier tipo de buque es la estabilidad. Los criterios de estabilidad intacta actuales, las cuales son referidos como Primera Generación, surgen desde los años treinta con parámetros básicos en las reglas de sociedades de clasificación. Luego, la estabilidad del buque tuvo un gran desarrollo con el trabajo de Rahola en el año 1939 y posteriormente el criterio meteorológico en los cincuenta [8]. Finalmente, las regulaciones de la primera generación fueron formuladas en el año del 2008 por el Comité Marítimo de Seguridad (MSC) de la Organización Marítima Internacional (OMI) [9] y adoptadas a nivel mundial en julio del 2010.

El desarrollo de la Segunda Generación de Criterios de Estabilidad Intacta se inició en el año del 2005 por el Sub-Comité en Estabilidad, Líneas de Carga y Seguridad de Naves Pesqueras (SFL) de la OMI. En el mismo año el sub-comité tuvo la iniciativa de elaborar criterios basados en fenómenos dinámicos que ocasionan grandes ángulos de balance en los buques. Esto lleva a desarrollar criterios de evaluación para cuatro modos de falla, formulados por el Sub-comité en Diseño y Construcción de Buques [10].

La diferencia entre la primera y segunda generación de criterios de estabilidad intacta radica en la acción dinámica del buque en olas. En la primera generación se utiliza criterios de evaluación con el buque estático expuesto a viento y olas de costado, resumidos en el criterio meteorológico. En cambio, en la segunda generación se considera al buque en navegación con olas de proa y popa, además de correcciones de los criterios de primera generación. En general la diferencia entre la primera y la segunda generación es la dirección de la incidencia de las olas en el buque, observado en la siguiente figura:

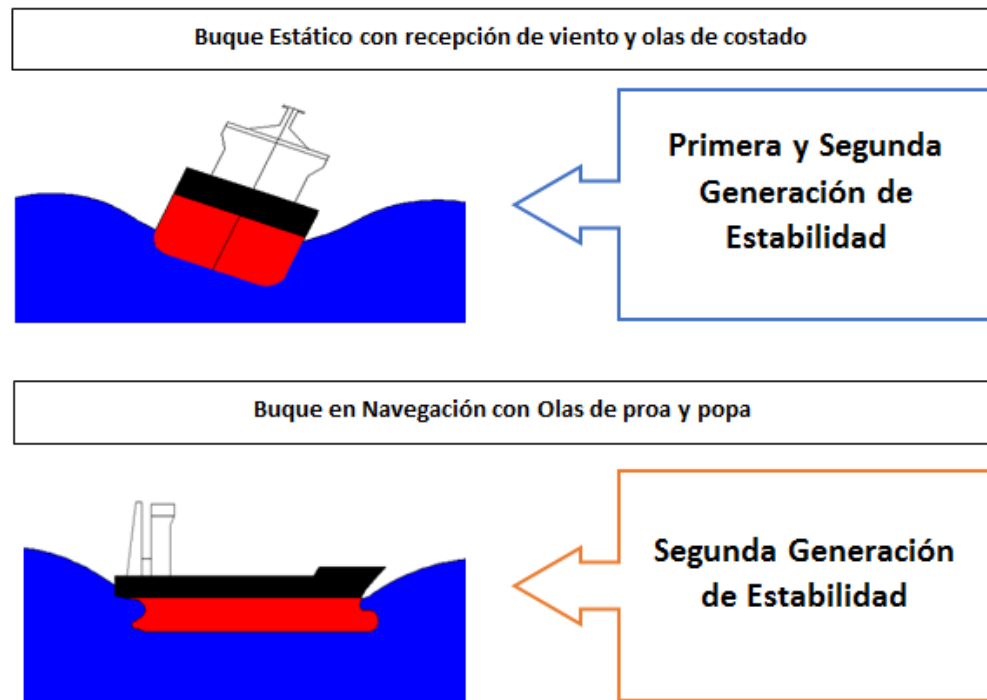


Figura 1.1 Diferencia general entre Primera y Segunda Generación de Estabilidad

Para las respuestas del buque en olas, la OMI propone evaluar, en la segunda generación de criterios de estabilidad, los cuatro modos de falla del buque con niveles orientados al diseño preliminar y a la operatividad del buque [8]. Los niveles de evaluación en orden son:

- Nivel I de Vulnerabilidad
- Nivel II de Vulnerabilidad
- Evaluación Directa
- Orientación Operativa

Los dos niveles de Vulnerabilidad son criterios usados para un proceso de evaluación del diseño del buque. En cambio, los dos niveles siguientes están

relacionados a la operatividad del buque, es decir, son niveles que restringen los casos de navegación de la nave [11] (tabla 1). En la figura 1.2 se presenta la metodología de la segunda generación, notándose que, cuando se satisface uno de los niveles, directamente se procede a evaluar el siguiente modo de falla sin necesidad de evaluar el siguiente nivel del mismo modo.

| Modos de Falla | Criterio de Vulnerabilidad | | Evaluación directa | Orientación Operativa |
|--|----------------------------|----------|--|---------------------------------|
| | Nivel I | Nivel II | | |
| <i>Pérdida Esencial de Estabilidad</i> | Orientado al diseño | | Orientado entre operatividad y diseño | Orientado a operatividad |
| <i>Balance Paramétrico</i> | | | | |
| <i>Navegación sobre la cresta</i> | | | | |
| <i>Buque Apagado</i> | | | | |

Tabla 1 Enfoque de los Niveles de Evaluación [11]

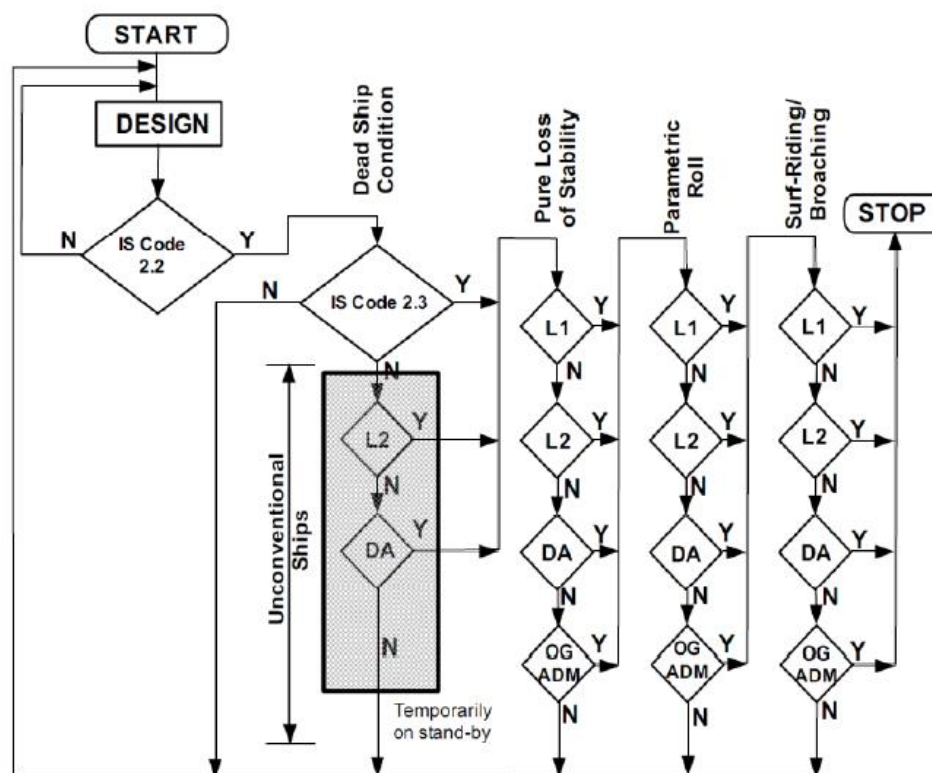


Figura 1.2 Diagrama de Flujo de la Segunda Generación [8]

El Sub-comité en Diseño y Construcción de Buques de la OMI está encargado de realizar el desarrollo de los criterios de vulnerabilidad (niveles I y II de evaluación) para las cuatro modalidades de falla. Estos se basan en análisis estocásticos considerando la irregularidad de la superficie del mar [12]. Estos criterios aún se encuentran en un proceso de aceptación por entidades marítimas y sociedades de clasificación; sin embargo su objetivo es ser mandatorios a corto plazo. Finalmente, en el presente proyecto se realiza la evaluación de los dos primeros niveles de vulnerabilidad (figura 1.3) para los cuatro modos de falla de un buque pesquero para en un futuro evaluar la probabilidad de zozobra.

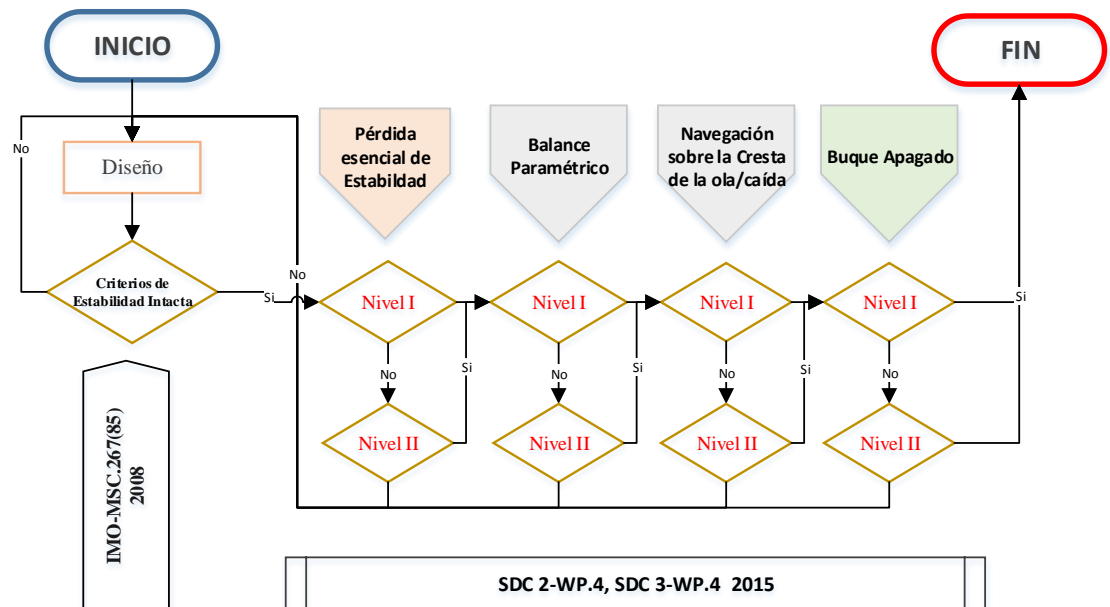


Figura 1.3 Evaluación de la segunda generación de estabilidad intacta para el presente proyecto

1.2 Modos de Zozobra

En la actualidad, la segunda generación de criterios de estabilidad nombra a los modos de zozobra como modelos de falla a la respuesta del buque generada por la incidencia dinámica de las olas sobre el buque. En la segunda generación se describen cuatro modalidades de falla con la adición de una última (aceleraciones excesivas) aunque en el presente proyecto se limita a las cuatro primeras:

- Pérdida Esencial de Estabilidad (“*Pure Loss*”)
- Balance Paramétrico (“*Parametric Roll*”)
- Navegación sobre la Cresta de la ola/caída (“*Surf-Riding*”)
- Buque Apagado (“*Dead Ship*”)
- Aceleraciones Excesivas (“*Excessive Accelerations*”)

Pérdida Esencial de Estabilidad

La pérdida esencial de estabilidad de un buque es un fenómeno producido por la influencia del perfil de la ola sobre la inercia del plano de flotación. En general, esta modalidad de falla se evidencia cuando la cresta de la ola se ubica alrededor de la sección media y se descubren las secciones de proa y popa. Además, si el buque y la ola llevan cercanamente la misma velocidad, existe la posibilidad de que en un intervalo de tiempo relativamente largo, la cresta de la ola se mantenga en una posición en la que la curva de brazos adrizantes del buque se reduce de tal manera que es posible que la altura metacéntrica (GM) sea negativa. Finalmente con esta condición, el buque se escora y con un momento de adrizamiento del buque disminuido es propicio que la nave zozobre.

El escenario en el que buque se encuentra en el modo de zozobra de pérdida esencial de estabilidad se observa en la figura 1.4 con olas de popa de longitud aproximadamente igual a la eslora de la nave. En las gráficas a y b la cresta de la ola se encuentra alrededor de sección media y en proa/popa, respectivamente. Para estas dos situaciones se tiene la respectiva curva de brazos adrizantes (GZ) original (línea entrecortada) y la curva con la influencia de las olas (línea azul). En el caso a, se tiene una influencia negativa, produciendo una pendiente en el origen (proporcional al GM) de tipo negativo en la curva de brazos adrizantes.

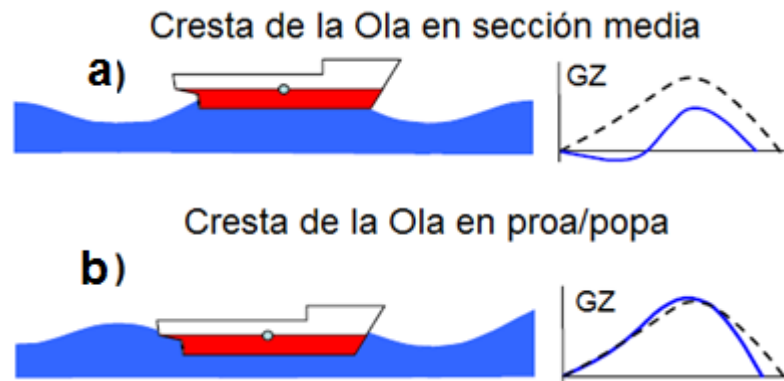


Figura 1.4 Manifestación Física de Pérdida eficaz de Estabilidad [8]

Balance Paramétrico

El balance paramétrico de un buque es el modo de zozobra generado por efecto de los cambios inercia en la flotación cuando la nave atraviesa olas de proa o popa que lo llevan a oscilar en balance. Este modo de falla se produce por la inestabilidad del rolido recibiendo únicamente olas de proa y popa, cuando la frecuencia de encuentro del buque en olas duplica la frecuencia natural de balance del buque [8]. En la figura 1.5 se encuentra una explicación gráfica de la modalidad de balance paramétrico, que se resume en el cambio periódico de la altura metacéntrica (GM) conforme la ola cruza sobre el buque.

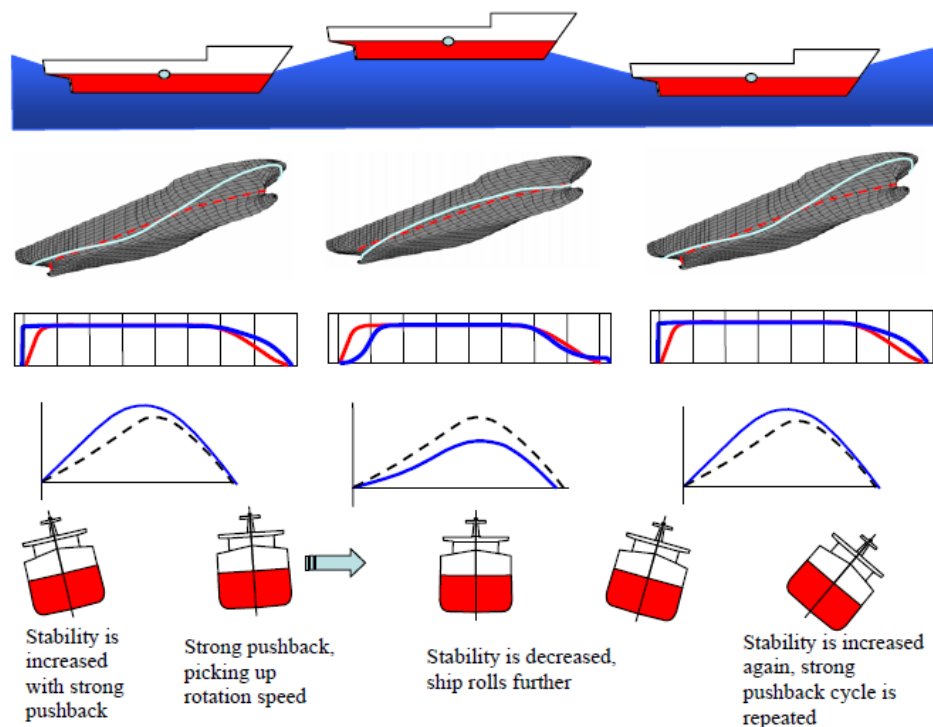


Figura 1.5 Desarrollo de Balance Paramétrico [12]

Navegación sobre la Cresta de la ola/guiñada súbita

La navegación sobre la cresta de la ola es generada cuando un buque recibe olas desde la popa y es capturado por una ola, acelerándolo a su misma velocidad y generando la posibilidad de que la nave realice un giro incontrolable que lleva a la zozobra. El giro incontrolable o la llamada guiñada súbita es una rotación incontrolable del buque a pesar de realizar un esfuerzo para evitar el cambio de dirección (figura 1.6). Físicamente, cuando el buque pasa a ser capturado por la ola, se genera una fuerza suficiente para acelerar a la nave (desequilibrio entre resistencia y empuje del buque) hasta llegar a la zozobra por giros incontrolables (figura 1.7).



Figura 1.6 Secuencia dinámica de Guiñada Súbita [13]

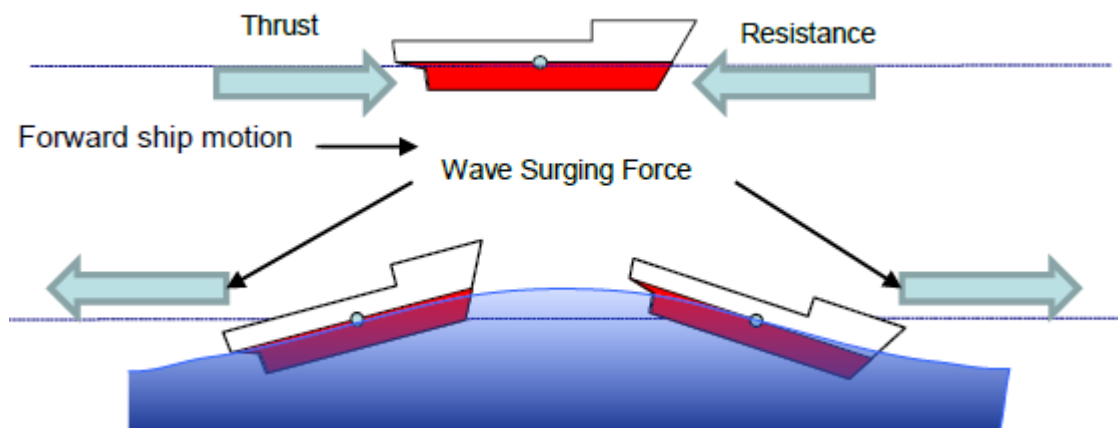


Figura 1.7 Fuerzas actuantes en el buque debido a olas. [12]

Buque Apagado

El llamado Buque Apagado es el modo de zozobra en el que la nave pierde propulsión (y por tanto velocidad); generalmente en esta situación produce la recepción olas de costado, juntándose además que el amortiguamiento en rolido es menor en velocidades bajas. Con el amortiguamiento relativamente bajo y las series de situaciones climatológicas mostradas en la figura 1.8 generan grandes ángulos de escora con posibilidad de zozobra. Este modo de zozobra es físicamente sustentada en el criterio meteorológico con una manera más rigurosa de evaluación.

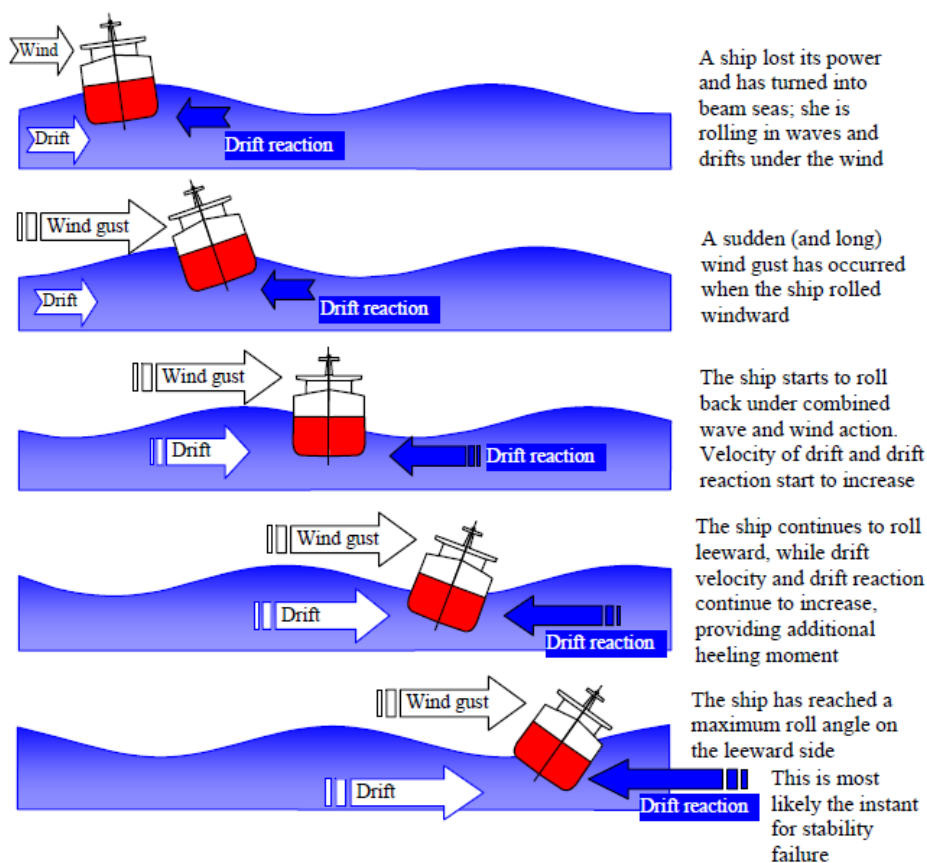


Figura 1.8 Escenario proclive para la modalidad de buque apagado [12]

Los buques pesqueros a través de los años se han convertido en las naves más propicias a la zozobra [14]. A nivel mundial, la explotación de recursos pesqueros origina actividades de pesca cada vez en medios de difícil navegación. A pesar de cumplir con los requerimientos de la primera generación de estabilidad intacta, se debe redirigir esta forma hacia la necesidad de considerar otras formas dinámicas de prevenir accidentes. Es por eso que en la segunda generación de estabilidad intacta las evaluaciones de todos los modos de fallas pueden indicar la confiabilidad de que un buque sea estable o tenga posibilidades de zozobra en un mal tiempo y en condiciones específicos de navegación.

1.3 Flota Pesquera Ecuatoriana

El Ecuador cuenta con una numerosa flota de buques pesqueros con permisos de navegación una vez que muestran el cumplimiento de los criterios estabilidad intacta. De la base de datos de la Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial [15] se determina que el rango de eslora de la flota de buques sardineros se encuentra entre 10 a 40 metros y la de los atuneros entre 40 a 90 metros (figura 1.9 y figura 1.10).

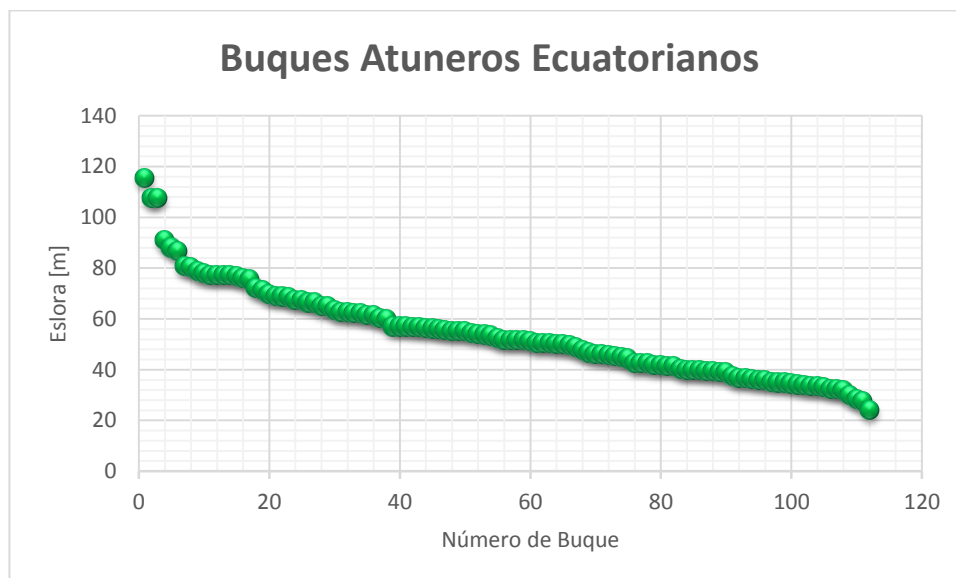


Figura 1.9 Rango de Eslora de buques atuneros

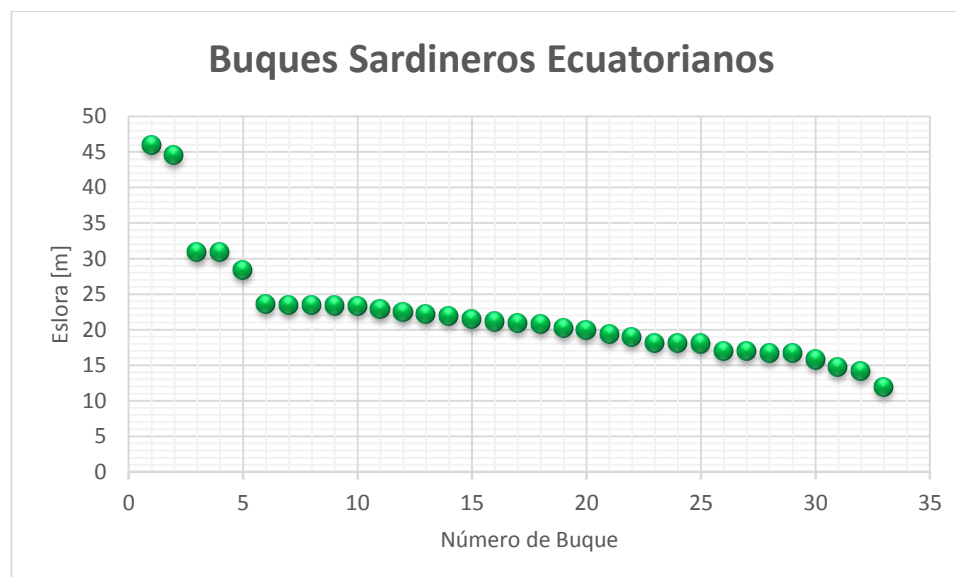


Figura 1.10 Rango de Eslora de buques sardineros

En general todos los buques pesqueros ecuatorianos tienen una velocidad de diseño alrededor de 12 nudos en condición de carga ligera, pero cuando cargan

pesca en las bodegas (totalmente cargado) llegan a tener velocidades cercanas a 10 nudos.

En [15] se investigan las causas comunes en las que se ven implicados los problemas de estabilidad de buques pesqueros para el caso de España:

- **Incremento en capacidades de combustibles:** Este incremento permite realizar faenas con trayectos más lejanos al puerto de zarpe. Por eso la disposición de armadores es el de usar nuevos espacios para combustible cuando en el proyecto inicial constaban como espacios vacíos. Los nuevos espacios de combustibles normalmente producen una reducción de estabilidad por efecto de superficie libre.
- **Acumulación de Pesos y obras de Reforma:** A lo largo de la vida útil de un buque pesquero se acumulan cargas extras como maquinarias (pesos no contados en el proyecto original) o renuevan las maquinarias (repuestos con mayor potencia). Esto comúnmente produce un incremento de pesos con respecto al original. Individualmente la contribución de peso es mínima, pero al momento de sumarlas tienden a ser significativas al evaluar los criterios de estabilidad. De manera que es recomendable realizar pruebas de inclinación cada 10 años para evitar el efecto de pérdida de estabilidad aun cuando no es parte de las regulaciones mandatorias.
- **Artes de Pesca:** Por motivos de faena los buques pesqueros frecuentemente adicionan un juego de artes de pesca extras en cubierta, significando una elevación no contada del centro de gravedad del buque.

Aun con las precauciones necesarias de las posibles causas de siniestros anteriores existen evidencias de buques pesqueros que zozobran por un mal temporal o fuerte oleaje en [1] , [2] y [16]. Inclusive con los criterios de estabilidad intacta aprobados, los buques tienen siniestros por situaciones climatológicas adversas, por ejemplo, en Ecuador cuatro barcos pesqueros zozobraron por causas de oleaje en los últimos 11 años [7]. Para ello, los criterios de la segunda

generación de estabilidad abarcan las situaciones más allá de las limitaciones empleadas en la primera generación de estabilidad intacta.

1.4 Características Principales del Buque Seleccionado

Para el presente análisis de estabilidad aplicando la segunda generación se ha seleccionado un buque atunero de 45 metros de eslora total ya que se encuentra entre los buques atuneros de menor dimensión, y además, puede ser considerado uno de los más grandes buques sardineros. Además, para este buque se han realizado simulaciones para la modalidad de navegación sobre la cresta de la ola/caída [7] y balance paramétrico [6].

La embarcación escogida se asemeja al buque que zozobró cerca de las islas Galápagos con una capacidad de bodega de 300 toneladas y con velocidad de operación de alrededor de 12 nudos [7]. En las formas del buque cuenta con doble china, un ángulo de astilla muerta de 15° y bulbo de proa:

| Características | Valor | Unidades |
|------------------------------|-------|----------|
| Eslora total | 44.03 | [m] |
| Eslora entre perpendiculares | 39.8 | [m] |
| Manga | 8.00 | [m] |
| Puntal | 5.03 | [m] |
| Calado de Diseño | 4.55 | [m] |
| Coefficiente Bloque | 0.65 | - |
| Potencia instalada | 1076 | [hp] |

Tabla 2 Características principales de la nave seleccionada [15]

Para mayor detalle, el plano de líneas de formas y la distribución general del buque en estudio se encuentran en la figura 1.11 y figura 1.12 respectivamente. En la tabla 3 se describen los datos del propulsor, además de los factores de estela y empuje, calculados aplicando las conocidas formulaciones de Holtrop-Mennen [17].

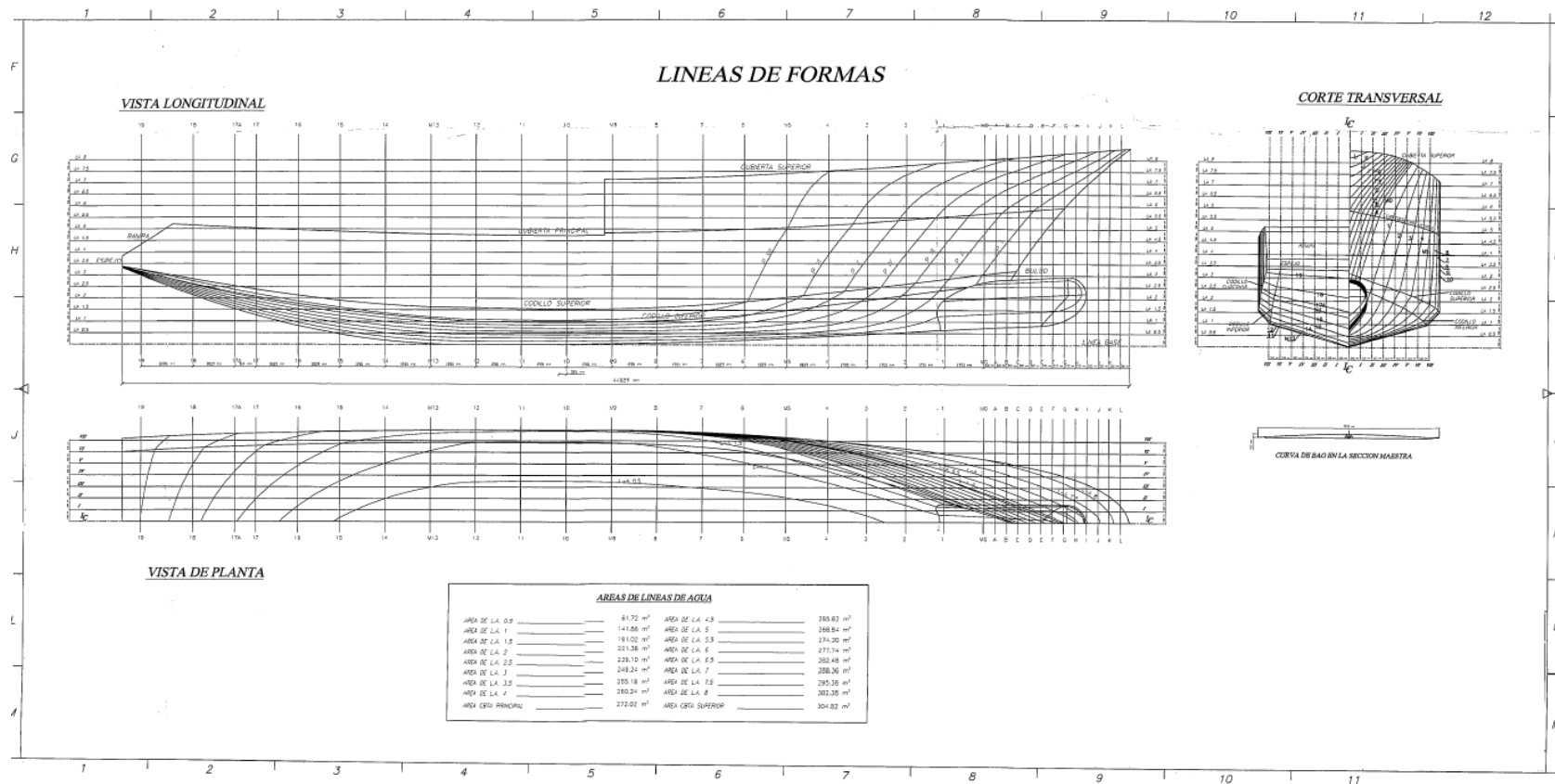


Figura 1.11 Plano de líneas de forma del buque seleccionado [15]

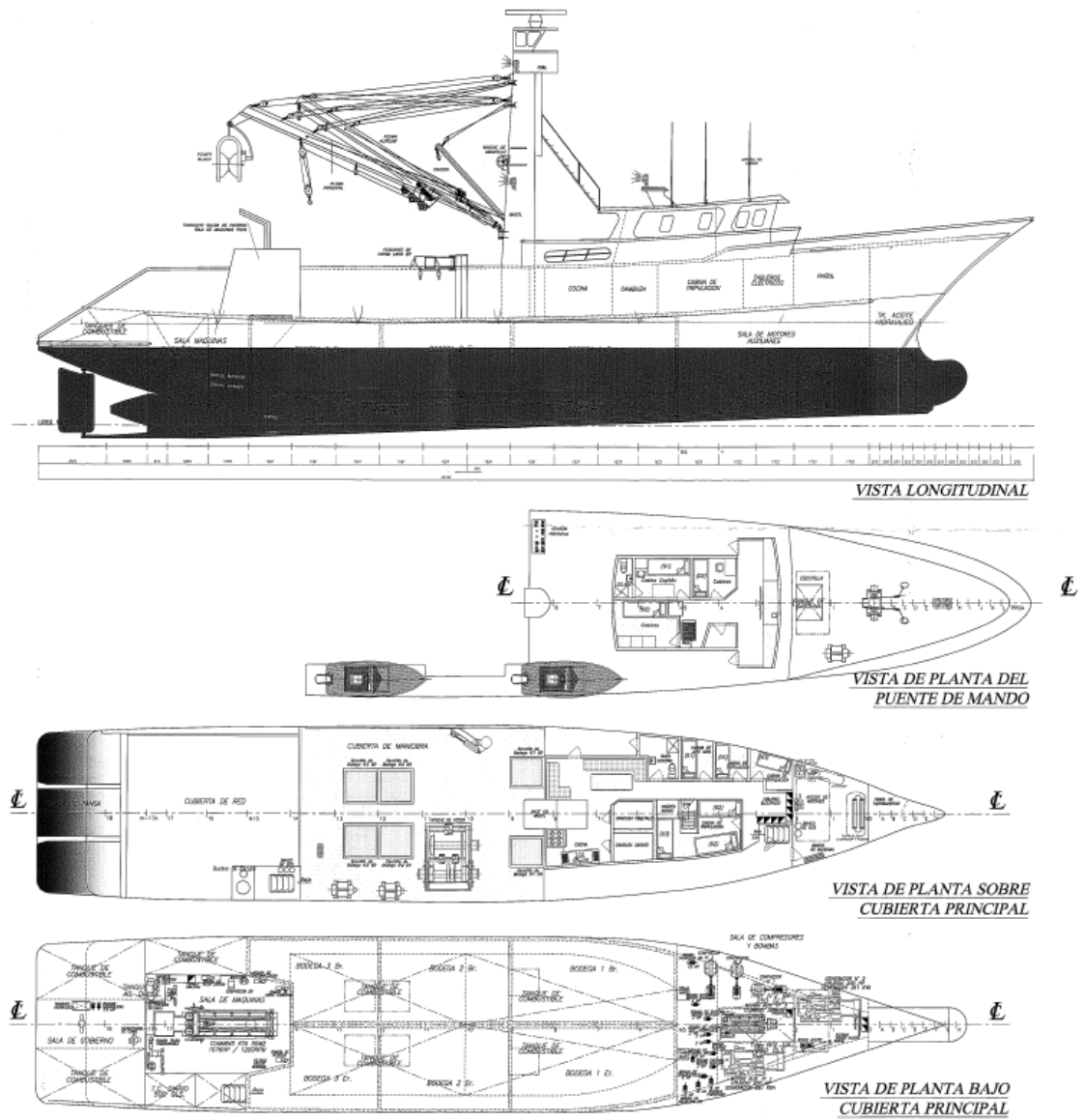


Figura 1.12 Distribución general del buque seleccionado [15]

| Datos del Propulsor | | |
|----------------------------------|------|-------|
| Diámetro, D | 1.90 | [m] |
| Razón paso / diámetro, P/D | 0.73 | - |
| Potencia al eje | 1000 | [hp] |
| Razón de área desarrollada, DAR | 0.6 | - |
| Número de propulsores, N | 1 | - |
| Número de palas del propulsor, Z | 4 | - |
| Velocidad de Rotación del eje | 350 | [RPM] |
| Factor de estela, w | 0.3 | - |
| Factor de deducción de empuje, t | 0.23 | - |

Tabla 3 Datos propulsivos del buque pesquero estudiado

Los análisis de vulnerabilidad de un buque dependen de la situación de carga de la nave, ya que cada una modifica significativamente la estabilidad y resistencia al avance del buque. Para ello, se han tomado dos situaciones de carga, la primera designada como Salida de Puerto (100% consumibles y 40% de salmuera en tanques de carga) (tabla 4) y la segunda es nombrada como Llegada a puerto (10% consumibles y 100% carga) (tabla 5). En la tabla 6 se comparan las características en cada condición de carga.

| CONDICION DE CARGA 1 SALIDA DE PUERTO (100% Consumibles) | | | | | | | |
|--|-----------|---------------|-------|------------------|--------|------------------|------------|
| Item | % Llenado | Peso [Ton] | Z [m] | Mto Vert [Ton*m] | X [m] | Mto Long [Ton*m] | Ix [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 Hidraulico Proa | 1.00 | 4.35 | 3.80 | 16.52 | 17.44 | 75.83 | 0.00 |
| Tripulacion | 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 |

| General: Salida de Puerto | | |
|----------------------------|-------|-----|
| Calado | 4.06 | [m] |
| Francobordo | 0.73 | [m] |
| Asiento (+ por Popa) | -0.17 | [m] |
| LCG (+ Secc. Media a Proa) | -2.41 | [m] |
| KG | 3.62 | [m] |
| GM _T | 0.44 | [m] |

Tabla 4 Condición de carga 1, Salida de Puerto [6]

| CONDICION 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. Combustible Proa | 0.10 | 0.08 | 1.26 | 0.10 | 14.27 | 1.16 | 0.00 |
| TQ. Combustible Proa (Eb) | 0.10 | 0.08 | 0.58 | 0.05 | 14.27 | 1.16 | 0.00 |
| TQ. Combustible Proa (Bb) | 0.10 | 0.08 | 0.58 | 0.05 | 14.27 | 1.16 | 0.00 |
| TQ. Combustible 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. Combustible Popa (Bb) | 0.20 | 5.21 | 2.66 | 13.85 | -17.98 | -93.64 | 4.34 |
| TQ. Combustible Popa (Eb) | 0.20 | 5.21 | 2.66 | 13.85 | -17.98 | -93.64 | 4.34 |
| TQ. Combustible Doble Fondo Proa (Bb-Eb) | 1.00 | 66.72 | 0.50 | 33.36 | 2.22 | 148.12 | 0.00 |
| TQ. Combustible Doble Fondo Popa (Bb-Eb) | 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 Hidraulico Proa | 0.10 | 0.43 | 2.63 | 1.14 | 17.44 | 7.58 | 0.00 |
| Tripulacion | 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 | | -2229.95 | 146.00 |

| General: Llegada a Puerto | | |
|----------------------------|-------|-----|
| Calado | 4.43 | [m] |
| Francobordo | 0.35 | [m] |
| Asiento (+ por Popa) | -0.22 | [m] |
| LCG (+ Secc. Media a Proa) | -2.49 | [m] |
| KG | 3.51 | [m] |
| GM _T | 0.57 | [m] |

Tabla 5 Condición de carga 2, Llegada a Puerto [6]

| | Salida de Puerto | Llegada a Puerto | Unidades |
|---|------------------|------------------|-------------------|
| Calado, T | 4.09 | 4.43 | [m] |
| Eslora total, L_T | 44.03 | 44.03 | [m] |
| Eslora en línea de agua, L_w | 42.11 | 42.11 | [m] |
| Eslora entre perpendiculares, L_{pp} | 37.83 | 37.83 | [m] |
| Manga, B | 8.014 | 8.014 | [m] |
| Asiento (+Por Popa), t | -0.170 | -0.220 | [m] |
| Coefficiente de área seccional, C_m | 0.855 | 0.866 | - |
| Coefficiente prismático, C_p | 0.664 | 0.675 | - |
| Coefficiente bloque, C_b | 0.568 | 0.585 | - |
| Coefficiente de plano de agua, C_w | 0.791 | 0.790 | - |
| Volumen de desplazamiento, V | 783.50 | 874.10 | [m ³] |
| Desplazamiento, Δ | 802.80 | 895.60 | [ton] |
| LCB (+Por Proa) | -2.410 | -2.490 | [m] |
| %LCB (+Por Proa) | -5.723 | -5.913 | [%] |
| LCF (+Por Proa) | -3.760 | -3.470 | [m] |
| Alto centro boyantez, KB | 2.470 | 2.660 | [m] |
| Radio Metacéntrico Transversal, B_{Mt} | 1.580 | 1.420 | [m] |
| Radio Metacéntrico Longitudinal, B_{Ml} | 34.60 | 30.90 | [m] |
| Metacentro Transversal, K_{M_T} | 4.060 | 4.080 | [m] |
| Metacentro Longitudinal, K_{M_L} | 37.10 | 33.50 | [m] |
| Superficie Mojada, S_m | 488.75 | 516.21 | [m ²] |
| Área de Plano de Agua, A_w | 267.02 | 266.7 | [m ²] |
| Centro de gravedad vertical, KG | 3.62 | 3.51 | [m] |
| Altura Metacéntrica, GM_T | 0.44 | 0.57 | [m] |
| Superficie mojada de apéndices | 49.00 | 49.00 | [m ²] |
| Área sumergida del Espejo | 4.22 | 4.33 | [m ²] |
| Inmersión del Propulsor | 2.81 | 3.12 | [m] |
| Área transversal del Bulbo | 2.27 | 2.27 | [m ²] |
| Alto al centroide del Bulbo | 1.75 | 1.75 | [m] |

Tabla 6. Cálculos hidrostáticas de ambas situaciones de carga.

Utilizando las formulaciones de Holtrop-Mennen se calcula la resistencia al avance del buque incluyendo un factor de seguridad del 10% para las dos condiciones de carga (figura 1.13).

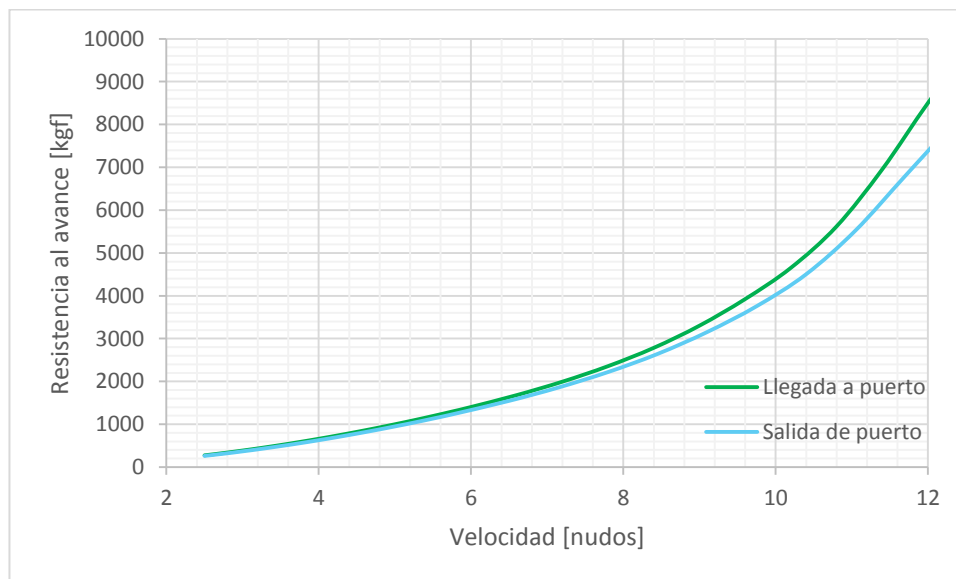


Figura 1.13 Resistencia al avance del buque pesquero

CAPÍTULO 2

2. EVALUACIÓN DEL NIVEL I DE VULNERABILIDAD DEL BUQUE ATUNERO

En el presente capítulo se describen las formulaciones y la forma de implementación del Nivel I de vulnerabilidad para cada uno de los modos de falla según la segunda generación de criterios de estabilidad. La implementación usa MATLAB R2016b como lenguaje de programación. El procedimiento empieza con la lectura de datos y al final los resultados de la evaluación de vulnerabilidad se presentan en un documento Excel. Los reglamentos actuales en desarrollo por el Subcomité de Diseño y Construcción de Buques (SDC) de la OMI y que son implementados en este trabajo para cada modo de falla corresponden a las siguientes referencias:

- Nivel I de Pérdida Esencial de Estabilidad: ANNEX 1, SDC 2/WP.4, 2015 [18]
- Nivel I de Balance Paramétrico: ANNEX 2, SDC 2/WP.4, 2015 [18]
- Nivel I de Navegación sobre la cresta de la Ola: ANNEX 3, SDC 2/WP.4, 2015 [18]
- Nivel I de Buque Apagado: ANNEX 1, SDC 3/WP.5, 2016 [12]

Los criterios de vulnerabilidad en la segunda generación de criterios estabilidad son aplicadas a la embarcación atunera para las dos condiciones de carga descritas en el capítulo anterior (Salida de Puerto y Llegada a Puerto). En la segunda generación se considera incidencia de las olas sobre el buque, para ello en la figura 2.1 y figura 2.2 se muestran la altura metacéntrica como función de la altura de la ola en porcentajes de la eslora del buque y la posición de la cresta a través del buque, para las dos condiciones de carga. En la figura 2.1 correspondiente a la condición de carga de Salida de Puerto se obtienen alturas metacéntricas negativas desde altura de ola del 8% de eslora, al cambio en la figura 2.2 se muestra una disminución significativa de GM_T pero lograr la obtención de valores negativos. Para ambas situaciones de carga, la disminución es

notable cuando la cresta de la ola se ubicada a alrededor de 0.6 a 0.7 de la eslora desde proa.

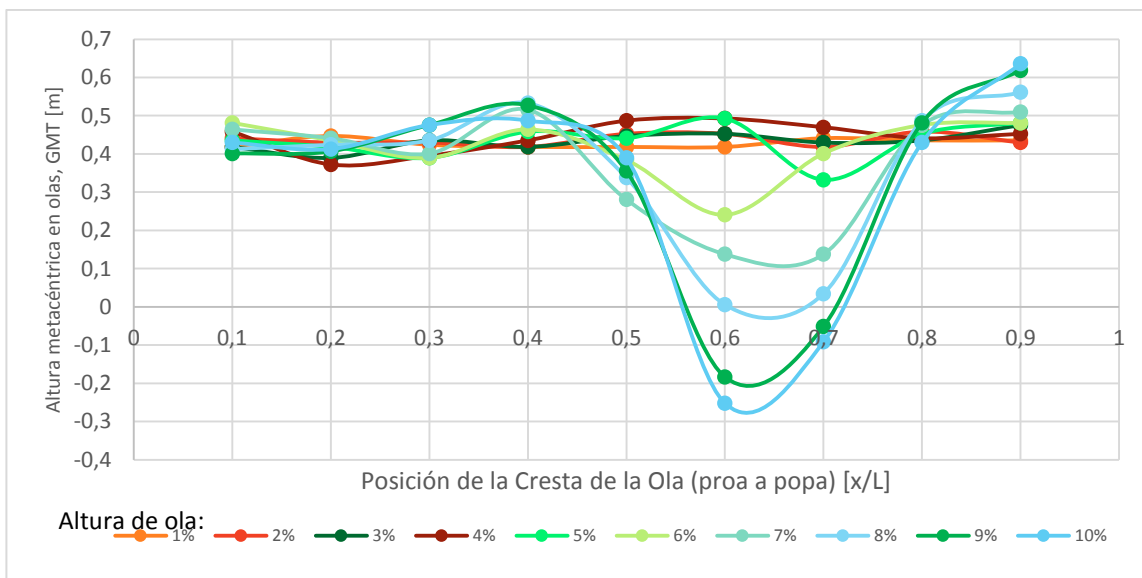


Figura 2.1 Salida de Puerto: GM_T en Olas vs Posición de la cresta de la ola

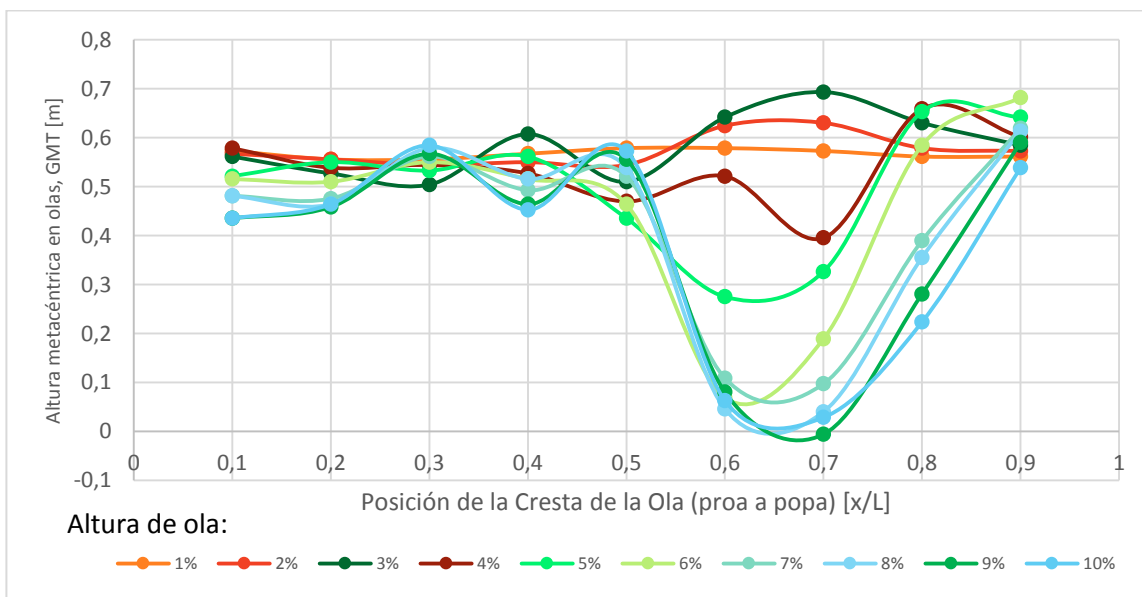


Figura 2.2 Llegada a Puerto: GM_T en Olas vs Posición de la cresta de la ola

2.1 Pérdida Esencial de Estabilidad

El diagrama de flujo para la evaluación del nivel I de vulnerabilidad de Pérdida esencial de Estabilidad se presenta en la figura 2.3. El proceso incluye un condicional que diferencia la forma de calcular la altura metacéntrica transversal mínima, el primero dependiente a un calado menor crítico y el otro método es a través de la mínima altura metacéntrica del buque cuando atraviesa una ola. La vulnerabilidad del Nivel I finaliza concluyendo con la no zozobra o proceder al análisis en el Nivel II para este modo de falla.

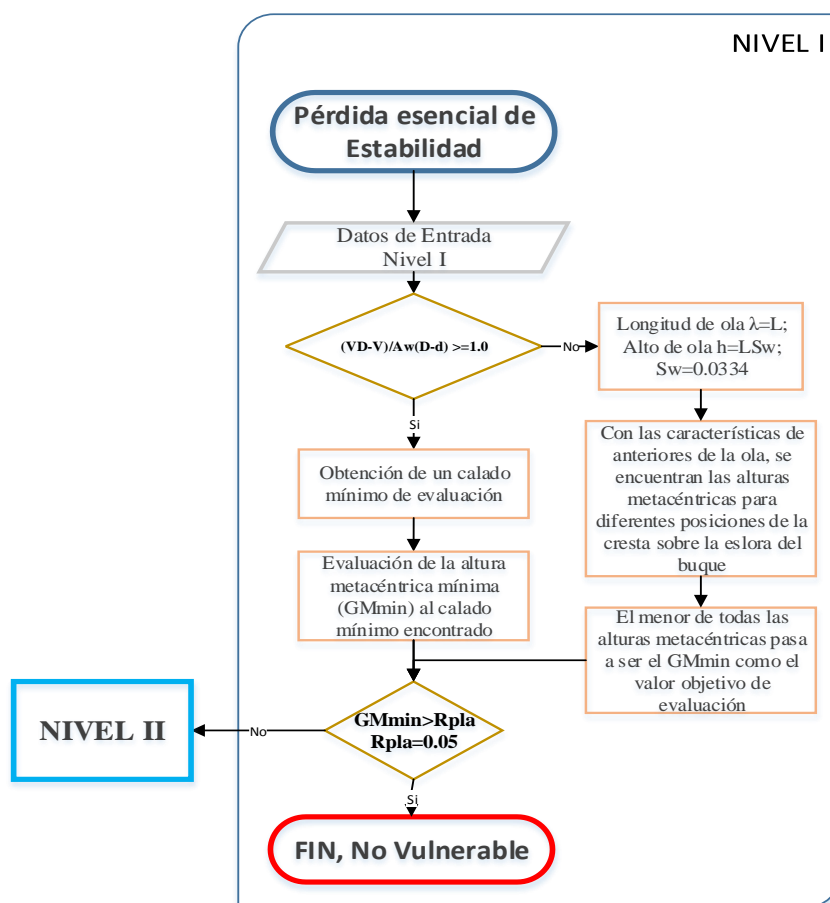


Figura 2.3 Diagrama de flujo del Nivel I de Vulnerabilidad de Pérdida esencial de Estabilidad

Reglas para la evaluación del Nivel I de Pérdida esencial de Estabilidad

Un buque no es vulnerable a Pérdida Esencial de estabilidad si satisface la relación:

$$GM_{min} \geq 0.05 \text{ metros.} \quad (2.1)$$

Para evaluar la altura metacéntrica mínima (GM_{min}) existen dos formas dependiendo del siguiente condicional:

$$\frac{V_D - V}{A_w(D - d)} \geq 1 \quad (2.2)$$

donde,

V_D : Es el volumen de desplazamiento del casco al puntal, metros cúbicos.

V : Es el volumen de desplazamiento al calado en la condición de carga, metros cúbicos.

A_w : Es el área de plano de flotación al calado en la condición de carga, metros cuadrados.

D : Es el puntal del buque, metros.

d : Es el calado en la condición de carga, metros.

- a) Si se satisface la condición de la ecuación 2.2, se calcula de la altura metacéntrica mínima (GM_{min}) con la ecuación 2.3

$$GM_{min} = KB + \frac{I_L}{V} - KG \quad (2.3)$$

La inercia de plano de flotación (I_L) se calcula a un menor calado que el de la condición de la carga en estudio (d_L) (ecuación 2.5).

$$\delta d_L = \min(d - 0.25d_{full}, 0.5 S_w L); S_w = 0.0334 \quad (2.4)$$

$$d_L = d - \delta d_L ; I_L = f(d_L) \quad (2.5)$$

- b) Si no se satisface la condición 2.2, se calcula el valor mínimo de las alturas metacéntricas considerando olas con las siguientes características y en las diferentes posiciones de la cresta de la ola

$$\text{Longitud de la ola : } \lambda = L ; \text{ Alt de la ola : } h = 0.0334L \quad (2.6)$$

$$\text{Posición de la cresta de la ola (desde proa) = } iL ; i = 1, 2, \dots, 9 \quad (2.7)$$

Implementación del Nivel I de Pérdida esencial de Estabilidad

El ingreso de datos al programa se hace por medio de un archivo con formato Microsoft Excel descrito en la tabla 7 y la tabla 8; es necesario acotar lo siguiente:

- d_{full} es el calado a la máxima condición de carga, lo cual para este proyecto corresponde a la condición de llegada a puerto (4.43 metros).
- El volumen de desplazamiento al puntal y calado de diseño (V_D y V), área (A_w) e inercia del plano de flotación (I_L) son calculados con el asiento de la condición de carga en estudio.
- Se debe ingresar la curva de brazos de brazos adrizantes en olas para cada posición de la cresta a lo largo del buque, para ángulos de escoras bajas (hasta 10 grados) con las características de ola según las ecuaciones 2.6 y 2.7.

| | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|-------------------|---------|--------------------------------------|
| Eslora, L | 42.11 | 42.11 | [m] | | |
| KB | 2.47 | 2.66 | [m] | | |
| KG | 3.62 | 3.51 | [m] | | |
| Calado, T | 4.09 | 4.43 | [m] | | |
| Puntal, D | 5.035 | 5.035 | [m] | | |
| Volumen al calado, V | 783.5 | 874.1 | [m ³] | | |
| Volumen al puntal, V _b | 1033.8 | 1033.8 | [m ³] | | |
| Calado a máx. carga, d _{full} | 4.43 | 4.43 | [m] | | |
| Área de plano de flot., A _w | 267.02 | 266.7 | [m ²] | | |
| Calado [m] | 1.00 | 393.80 | 1.00 | 391.65 | <i>I_L [m⁴]</i> |
| | 1.50 | 733.05 | 1.50 | 730.55 | |
| | 2.50 | 1075.65 | 2.50 | 1073.64 | |
| | 3.00 | 1161.74 | 3.00 | 1158.94 | |
| | 3.50 | 1217.35 | 3.50 | 1214.83 | |
| | 4.00 | 1238.80 | 4.00 | 1236.68 | |
| | 4.50 | 1241.27 | 4.50 | 1239.60 | |
| | 5.00 | 1209.15 | 5.00 | 1208.20 | |
| | Condición 1 | Condición 2 | | | |
| | Salida de | Llegada a | | | |
| | Puerto | Puerto | | | |

Tabla 7 Datos de Ingreso 1 para el Nivel I de Pérdida Esencial de Estabilidad

| GZ [m] | | θ [°] | | | θ [°] | | |
|--|---|--------------|-------|-------|---|-------|-------|
| | | 0 | 5 | 10 | 0 | 5 | 10 |
| Posición de la cresta de la ola: desde proa a popa | 0.9 L | 0 | 0.041 | 0.085 | 0 | 0.053 | 0.107 |
| | 0.8 L | 0 | 0.039 | 0.079 | 0 | 0.052 | 0.095 |
| | 0.7 L | 0 | 0.037 | 0.072 | 0 | 0.045 | 0.073 |
| | 0.6 L | 0 | 0.039 | 0.072 | 0 | 0.042 | 0.069 |
| | 0.5 L | 0 | 0.040 | 0.076 | 0 | 0.043 | 0.084 |
| | 0.4 L | 0 | 0.038 | 0.078 | 0 | 0.048 | 0.092 |
| | 0.3 L | 0 | 0.036 | 0.075 | 0 | 0.048 | 0.096 |
| | 0.2 L | 0 | 0.037 | 0.076 | 0 | 0.048 | 0.095 |
| | 0.1 L | 0 | 0.039 | 0.080 | 0 | 0.049 | 0.096 |
| | Condición 1 Salida de Puerto | | | | Condición 2 Llegada a Puerto | | |

Tabla 8 Datos de Ingreso 2 para el Nivel I de Pérdida Esencial de Estabilidad

Ya que existen dos maneras de calcular la altura metacéntrica, el programa evalúa ambas para luego elegir la ordenada de acuerdo con la regla. La **primera forma** de evaluar el GM_T se basa en la inercia de plano de flotación a un calado menor que el de la condición de carga respectiva. Para esto el programa genera un polinomio de quinto orden en base a los datos de la tabla 7 con los valores de inercia a diferentes calados como se observa en la figura 2.4. Este polinomio aproxima de manera adecuada la inercia de plano de flotación en función del calado. Luego se evalúa la inercia en el calado mínimo, para finalmente encontrar el radio metacéntrico mínimo con la ecuación 2.3.

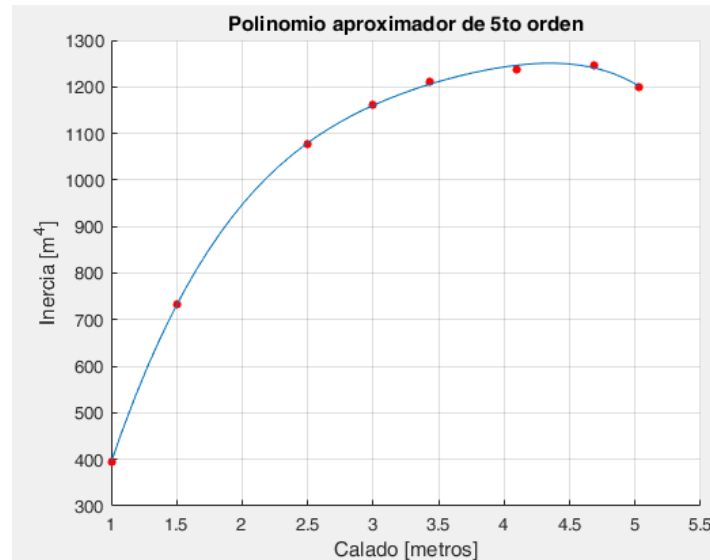


Figura 2.4 Inercia de plano de flotación en función del calado

La **segunda forma** en la que el programa evalúa la altura metacéntrica mínima es desarrollando un polinomio de segundo orden de la curva brazos adrizantes (ecuación 2.8) de cero a diez grados para cada posición de la cresta de la ola. La altura metacéntrica corresponde a la pendiente del polinomio de la curva de brazos adrizantes evaluada en el origen (ecuación 2.9). Finalmente la altura metacéntrica es el mínimo de todos los GM_T de cada posición de la cresta de la ola (ecuación 2.10).

$$GZ(\text{Posición de la cresta de la ola}) = A\theta^2 + B\theta + C \quad (2.8)$$

$$GM(\text{Posición de la cresta de la ola}) = \left. \frac{dGZ}{d\theta} \right|_{\theta=0} = B \quad (2.9)$$

$$GM_{min} = \text{mínimo}(GM(\text{Posición de la cresta de la ola})) \quad (2.10)$$

Resultados de la evaluación del Nivel I de Pérdida Esencial de Estabilidad

El programa muestra en una tabla Excel (tabla 9) para la condición de carga analizada, ambas formas de cálculo de la altura metacéntrica mínima. Luego presenta el resultado de la selección de acuerdo de la ecuación 2.2. Finalmente presenta el resultado de la evaluación de vulnerabilidad del buque. La tabla 9 muestra la evaluación del Nivel I de vulnerabilidad en Pérdida Esencial de Estabilidad en la primera condición de carga. La evaluación de la segunda condición de carga del buque se muestra en el anexo 1.

| Condición de Carga Evaluada | | 1 | Unidades | |
|--|--|----------------------|-------------------|-----|
| Vd-V/Aw(D-d)>=1 | <i>Calado mínimo, d_L</i> | 3.39 | [m] | |
| | <i>Inercia al calado mínimo, I (d_L)</i> | 1205.62 | [m ⁴] | |
| | GM_{min} | 0.389 | [m] | |
| Vd-V/Aw(D-d)<1 | <i>Longitud de la Ola, λ</i> | 42.11 | [m] | |
| | <i>Altura de la Ola, H</i> | 1.41 | [m] | |
| | GM_T (λ, H) | 0.9 L | 0.453 | [m] |
| | | 0.8 L | 0.441 | [m] |
| | | 0.7 L | 0.435 | [m] |
| | | 0.6 L | 0.481 | [m] |
| | | 0.5 L | 0.481 | [m] |
| | | 0.4 L | 0.424 | [m] |
| | | 0.3 L | 0.395 | [m] |
| | | 0.2 L | 0.413 | [m] |
| 0.1 L | 0.435 | [m] | | |
| GM_{min}=min(GM_T) | 0.395 | [m] | | |
| Vd-V/Aw(D-d) | | 0.992 | - | |
| GM_{min} | | 0.395 | [m] | |
| No es Vulnerable SI GM_{min}<=0.05 | | No Vulnerable | | |

Tabla 9 Resultados de Pérdida Esencial de Estabilidad (Nivel I: Salida de Puerto)

En ambas condiciones de carga se determina que el buque no es vulnerable a la zozobra por Pérdida Esencial de Estabilidad. Además, en ambas situaciones de carga se calcula la altura metacéntrica mínima a través de las olas y no con la inercia del plano de flotación. En la figura 2.5 se muestran las alturas metacéntricas para cada posición de cresta de la ola y para condición de carga, donde es notorio que los valores mínimos exceden el mínimo GM_T para este modo zozobra.

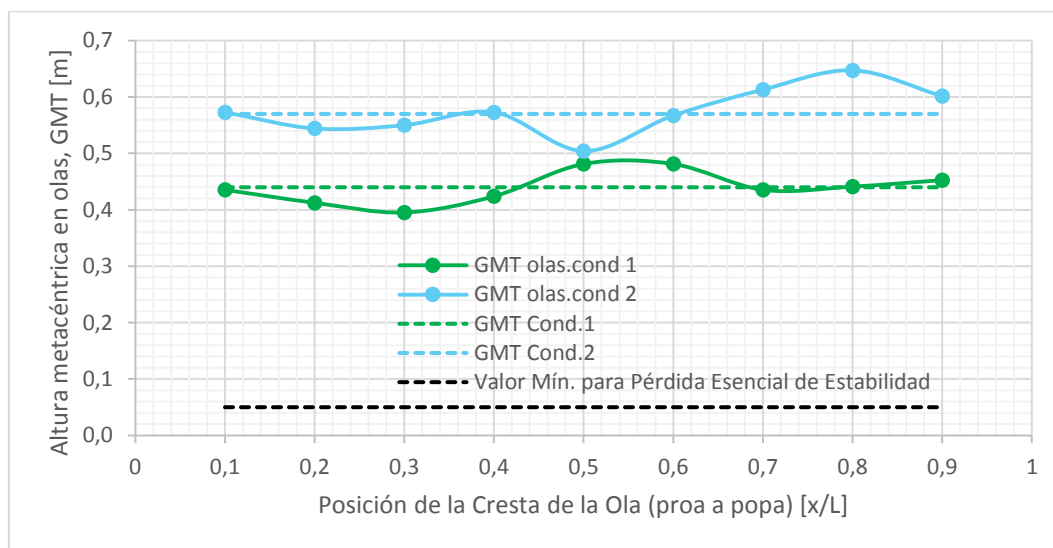


Figura 2.5 GM_T en olas Vs Posición de la cresta para Pérdida Esencial de Estabilidad

En la figura 2.6 se muestran las zonas en la que el buque puede zozobrar por el modo de falla de Pérdida esencial de estabilidad. En la gráfica se presenta la altura metacéntrica mínima en función de la altura de la ola para ambas condiciones de carga. Además, se agrega una zona de zozobra dependiente de los límites sugeridos de la regla, una altura metacéntrica mínima de 0.05 metros y el alto de ola máximo de 0.0334 de la eslora del buque. Finalmente para el modo de falla de Pérdida esencial de estabilidad se encuentra fuera de la zona de zozobra porque el buque pesquero inicia con una altura metacéntrica (en aguas tranquilas) alrededor a 10 veces mayor que al límite de zozobra.

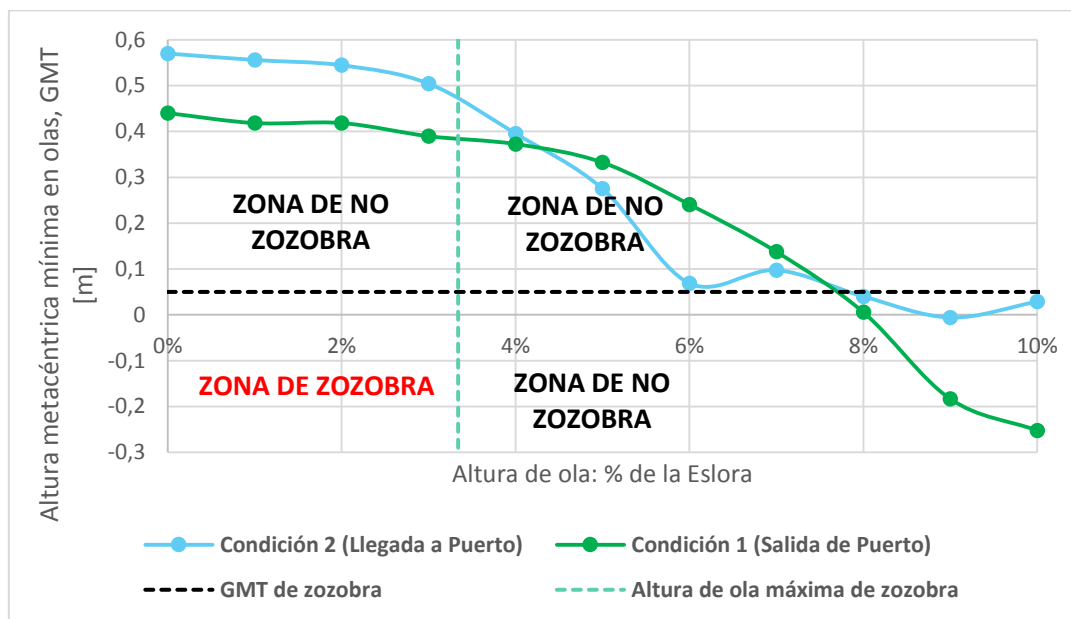


Figura 2.6 Altura Metacéntrica mínima VS Altura de Ola

2.2 Balance Paramétrico

El diagrama de flujo de la figura 2.7 muestra el algoritmo del Nivel I para evaluar el Balance Paramétrico. Se muestra un condicional en que diferencia la forma de calcular el cambio medio de la altura metacéntrica, el primero es dependiente de dos valores de calado (mayor y menor que el de diseño) y el otro método es a través de la altura metacéntrica media del buque cuando atraviesa una ola. La vulnerabilidad del Nivel I finaliza concluyendo con la no zozobra o proceder al análisis en el Nivel II para este modo de falla.

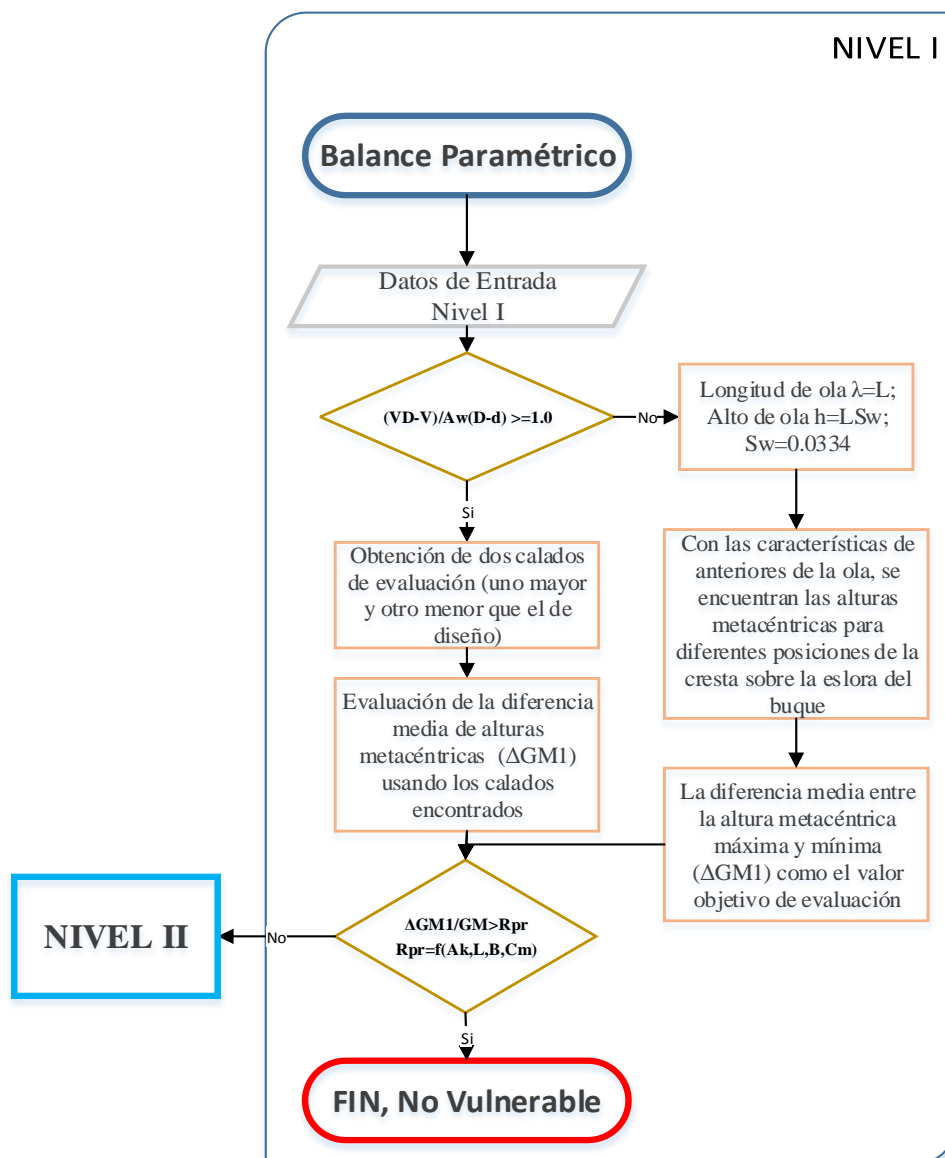


Figura 2.7 Diagrama de flujo del Nivel I de Vulnerabilidad de Balance Paramétrico

Reglas para la evaluación del Nivel I de Balance Paramétrico

Un buque no es vulnerable al balance paramétrico si satisface la condición 2.11, en donde R_{PR} es un valor calculado en base al coeficiente de sección media y el área proyectada de la quilla de balance (su cálculo se describe en el anexo 2).

$$\frac{\Delta GM_1}{GM_T} \geq R_{PR} \quad (2.11)$$

La reglamentación en este nivel necesita calcular el cambio de altura metacéntrica media (ΔGM_1) conforme la ola atraviesa el buque. Para ello existen dos maneras de evaluarlo, dependiendo del mismo condicional aplicado en el modo Pérdida esencial de estabilidad (ecuación 2.2). Las dos metodologías para el cálculo del cambio de altura metacéntrica media son:

- a) Si se satisface la condición de la ecuación 2.2, el cálculo es por medio de la diferencia de inercias del plano de flotación a un calado mayor y a otro menor que el de la condición de carga en estudio (d_H y d_L), según la ecuación 2.12. En la ecuación 2.13 y 2.14 se especifican los calados a los cuales se deben evaluar las inercias del plano de flotación

$$\Delta GM_1 = \frac{I_H - I_L}{2V} \quad (2.12)$$

$$\delta d_L = \min(d - 0.25d_{full}, 0.5S_w L); \delta d_H = \min(D - d, 0.5S_w L); S_w = 0.0167 \quad (2.13)$$

$$d_H = d + \delta d_H; d_L = d - \delta d_L; I_H = f(d_H); I_L = f(d_L) \quad (2.14)$$

- b) Si no se satisface la condición de la ecuación 2.2 se toma la mitad de la diferencia entre la altura metacéntrica máxima y mínima en olas, de acuerdo a las características de la ola en la ecuación 2.15 y en las diferentes posiciones de la cresta de la ola, ecuación 2.16.

$$\text{Longitud de la ola : } \lambda = L ; \text{ Alto de la ola : } h = 0.0167 L \quad (2.15)$$

$$\text{Posición de la cresta de la ola (desde proa)} = iL ; i = 1, 2, \dots, 9 \quad (2.16)$$

Implementación del Nivel I de Balance Paramétrico

Se utilizan los mismos datos que los utilizados para modo de Pérdida esencial estabilidad, y además se agrega la altura metacéntrica en aguas tranquilas y el área proyectada de la quilla de balance (tabla 10). También se debe ingresar las curvas de brazos adrizantes correspondientes a perfiles de olas con características dados en las ecuaciones 2.15 y 2.16 (tabla 11).

| | | | | | |
|---|-------------|-------------------------|-------------------|---------|--------------------------------------|
| Eslora, L | 42.11 | 42.11 | [m] | | |
| Manga, B | 8.014 | 8.014 | [m] | | |
| Puntal, D | 5.035 | 5.035 | [m] | | |
| Calado, d | 4.09 | 4.43 | [m] | | |
| Coefficiente de Sec. Media, Cm | 0.855 | 0.866 | - | | |
| Área proyectada de quilla, A _k | 0 | 0 | [m ²] | | |
| Altura Metacéntrica, GM _T | 0.44 | 0.57 | [m] | | |
| Volumen al calado, V | 783.5 | 874.1 | [m ³] | | |
| Volumen al puntal, V _D | 1033.8 | 1033.8 | [m ³] | | |
| Calado máxima carga, d _{full} | 4.43 | 4.43 | [m] | | |
| Área de plano de flot., A _w | 267.02 | 266.7 | [m ²] | | |
| Calado [m] | 1.00 | 393.80 | 1.00 | 391.65 | <i>I_L [m⁴]</i> |
| | 1.50 | 733.05 | 1.50 | 730.55 | |
| | 2.50 | 1075.65 | 2.50 | 1073.64 | |
| | 3.00 | 1161.74 | 3.00 | 1158.94 | |
| | 3.50 | 1217.35 | 3.50 | 1214.83 | |
| | 4.00 | 1238.80 | 4.00 | 1236.68 | |
| | 4.50 | 1241.27 | 4.50 | 1239.60 | |
| | 5.00 | 1209.15 | 5.00 | 1208.20 | |
| Condición 1 | | Condición 2 | | | |
| Salida de Puerto | | Llegada a Puerto | | | |

Tabla 10 Datos de Ingreso 1 para el Nivel I de Balance Paramétrico

| GZ [m] | | θ [°] | | | θ [°] | | |
|--|-------|-------|-------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | | 0 | 5 | 10 | 0 | 5 | 10 |
| Posición de la cresta de la ola: desde proa a popa | 0.1 L | 0 | 0.039 | 0.078 | 0 | 0.049 | 0.099 |
| | 0.2 L | 0 | 0.039 | 0.077 | 0 | 0.048 | 0.098 |
| | 0.3 L | 0 | 0.037 | 0.077 | 0 | 0.048 | 0.097 |
| | 0.4 L | 0 | 0.038 | 0.078 | 0 | 0.049 | 0.096 |
| | 0.5 L | 0 | 0.039 | 0.079 | 0 | 0.050 | 0.095 |
| | 0.6 L | 0 | 0.039 | 0.079 | 0 | 0.047 | 0.093 |
| | 0.7 L | 0 | 0.039 | 0.079 | 0 | 0.048 | 0.095 |
| | 0.8 L | 0 | 0.039 | 0.080 | 0 | 0.051 | 0.101 |
| | 0.9 L | 0 | 0.039 | 0.081 | 0 | 0.051 | 0.103 |
| | | | | | Condición 1 | | Condición 2 |
| | | | | Salida de Puerto | | Llegada a Puerto | |

Tabla 11 Datos de Ingreso 2 para el Nivel I de Balance Paramétrico

Las regulaciones de la OMI presentan dos formas de calcular el cambio de altura metacéntrica media, implementada en el programa de las siguientes maneras:

- En base al cambio de la inercia del plano de flotación evaluada a los calados según la ecuación 2.12. Para ello, de la misma manera que en el modo de Pérdida esencial de estabilidad se genera un polinomio de quinto orden de la inercia del plano de flotación en función del calado, para luego interpolar a los calados de interés.
- Se calcula la mitad de la diferencia entre la altura metacéntrica máxima y mínima en olas con las características según las ecuaciones 2.15 y 2.16, por medio de un polinomio de segundo orden de la curva brazos adrizantes. La altura metacéntrica se toma como la pendiente del polinomio de la curva de brazos adrizantes evaluada en el origen. Finalmente el cambio medio de altura metacéntrica se calcula con:

$$\Delta GM1 = \frac{GM_{max} - GM_{min}}{2} \quad (2.17)$$

Resultados del Nivel I de Balance Paramétrico

El programa implementado para la evaluación de Balance Paramétrico muestra en una tabla Excel (tabla 12) las características de la condición de carga y la evaluación de ambas formas del cambio medio de altura metacéntrica para seguir con la aplicación del condicional (ecuación 2.2). Finalmente se evalúa la vulnerabilidad del buque en los resultados mostrados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que muestra la evaluación del Nivel I de vulnerabilidad en Balance Paramétrico en la primera condición de carga. La evaluación de la segunda condición de carga se muestra en el anexo 1.

| Condición de Carga Evaluada | | 1 | Unidades | |
|--|------------------------------------|---------------|-------------------|-----|
| Vd-V/Aw(D-d)>=1 | Calado mínimo, d_L | 3.74 | [m] | |
| | Inercia al calado mínimo, $I(d_L)$ | 1231.14 | [m ⁴] | |
| | Calado máximo, d_H | 4.44 | [m] | |
| | Inercia al calado máximo, $I(d_H)$ | 1241.53 | [m ⁴] | |
| | ΔGM_T | 0.007 | [m] | |
| Vd-V/Aw(D-d)<1 | Longitud de la Ola, λ | 42.11 | [m] | |
| | Altura de la Ola, H | 0.70 | [m] | |
| | $GM_T(\lambda, H)$ | 0.1 L | 0.447 | [m] |
| | | 0.2 L | 0.441 | [m] |
| | | 0.3 L | 0.407 | [m] |
| | | 0.4 L | 0.424 | [m] |
| | | 0.5 L | 0.441 | [m] |
| | | 0.6 L | 0.441 | [m] |
| | | 0.7 L | 0.441 | [m] |
| | | 0.8 L | 0.435 | [m] |
| 0.9 L | 0.430 | [m] | | |
| $\Delta GM_T=0.5(\max(GM_T)-\min(GM_T))$ | 0.020 | [m] | | |
| Vd-V/Aw(D-d) | | 0.992 | - | |
| ΔGM_T | | 0.020 | [m] | |
| $\Delta GM_T/GM_T$ | | 0.046 | - | |
| R_{PR} | | 0.170 | - | |
| No es Vulnerable si $\Delta GM_T/GM_T \leq R_{PR}$ | | No Vulnerable | | |

Tabla 12 Resultados de Balance Paramétrico (Nivel I: Salida de Puerto)

En ambas condiciones de carga se determina que el buque no es vulnerable a la zozobra por Balance Paramétrico. Además, en las dos situaciones de carga, el cálculo del cambio medio de altura metacéntrica mínima se realiza a través de olas y no por medio de inercia de plano de flotación. En la figura 2.8 se muestra la altura metacéntrica en olas para cada posición de la cresta, para las dos condiciones de carga.

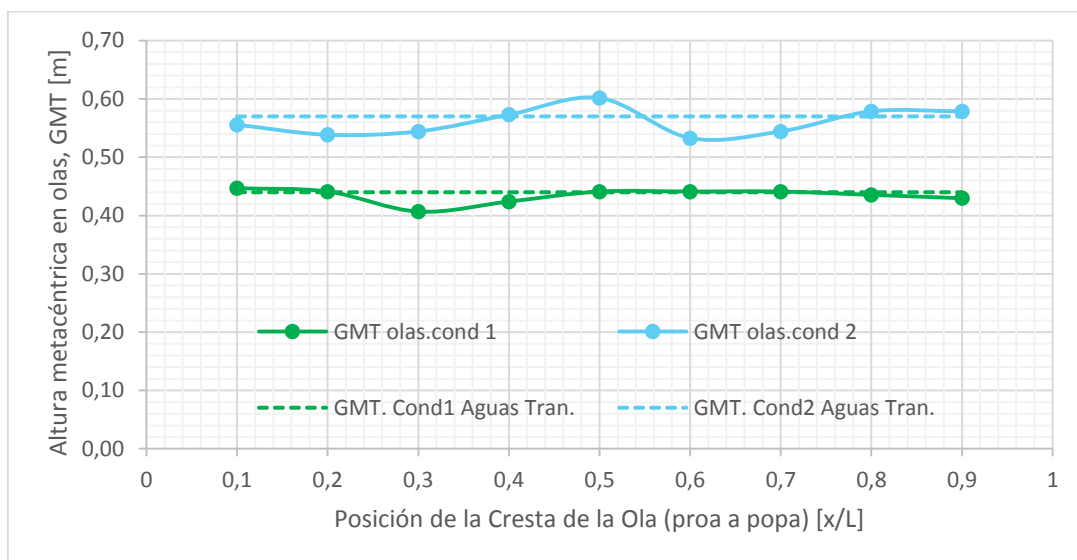


Figura 2.8 GM_T en olas Vs Posición de la cresta para Balance Paramétrico

En la figura 2.9 se muestran las zonas en la que el buque puede zozobrar según el modo de falla de Balance Paramétrico representados por la altura de la ola incidente. Se presenta el cambio medio de metacéntrica mínima por GM_T en aguas tranquilas en función de la altura de la ola para ambas condiciones de carga. Además, se agrega una zona de zozobra dependiente de los límites sugeridos de la regla, cambio medio de metacéntrica mínima por GM_T en aguas tranquilas máxima de 0.17 metros y el alto de ola máximo de 0.0167 de la eslora del buque. Finalmente, el buque se encuentra fuera de la zona de zozobra para el modo de falla de Balance Paramétrico lo cual concuerda con la simulación en [6].

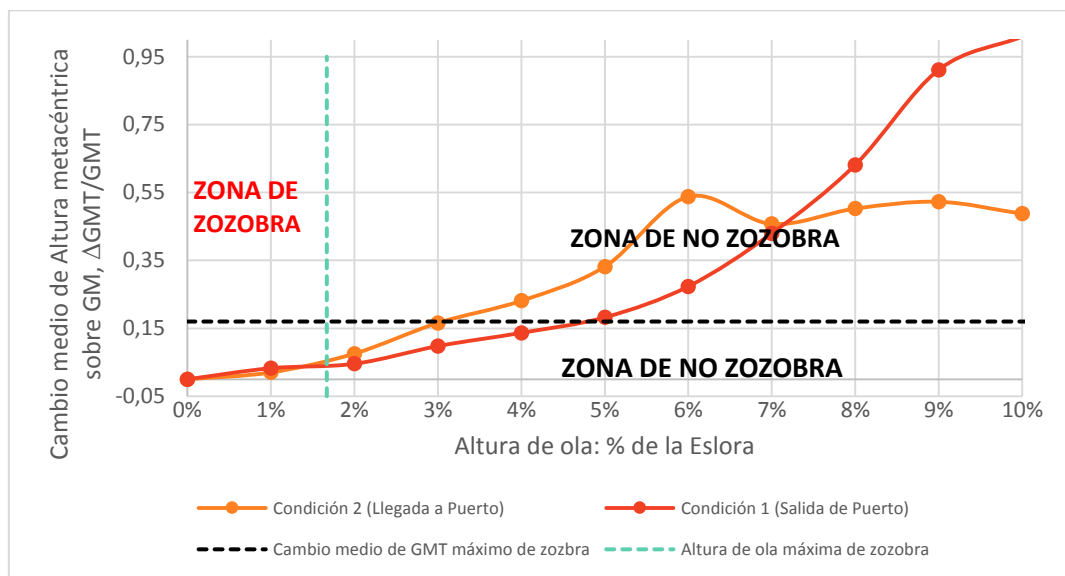


Figura 2.9 Cambio de Altura Metacéntrica por GM_T de aguas tranquilas VS Altura de Ola

2.3 Navegación sobre la Cresta de la ola/guiñada súbita

La evaluación para el nivel I de este modo de falla se basa en el número de Froude con el que opera el barco. La embarcación no es vulnerable en caso se cumpla la condición:

$$\text{Número de Froude: } Fn = \frac{0.514 V_s}{\sqrt{Lg}} \leq 0.3 \quad (2.18)$$

Debido a la simplicidad de este cálculo no es necesario implementar un programa de computación para ambas condiciones de carga, considerando que la eslora y la velocidad de las situaciones de carga son cercanas, se evalúa el número de Froude:

| | | |
|---------------|-------|---------|
| Eslora, L | 42.11 | [m] |
| Velocidad, Vs | 12.00 | [nudos] |
| Froude, Fn | 0.303 | - |

Tabla 13 Evaluación del número de Froude de la embarcación

Según el número de Froude, se debe evaluar en el siguiente nivel de vulnerabilidad. Tratando de generalizar este resultado, los buques pesqueros ecuatorianos navegan en un rango de velocidad entre 10 y 12 nudos. Graficando el número de Froude para la velocidad del buque según la eslora no se espera posibilidad zozobra a los buques pesqueros mayores a 45 metros, según el nivel I de vulnerabilidad en Navegación sobre la cresta de la ola (figura 2.10).

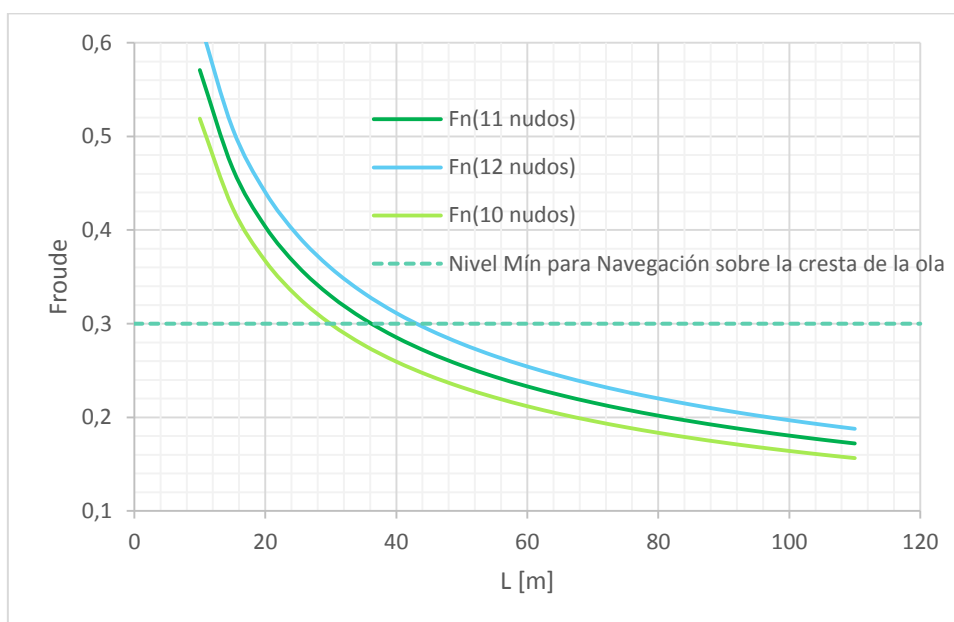


Figura 2.10 Evaluación del número de Froude en buques pesqueros Ecuatorianos

2.4 Buque Apagado

En el modo de Buque Apagado se implementa un programa que sigue los procedimientos del Criterio Meteorológico de la OMI [9], que difieren con el Nivel I de Buque apagado solo en un cálculo del periodo natural del rolido. El diagrama de flujo con que se implementa en un programa de computación para el Nivel I se encuentra en la figura 2.11.

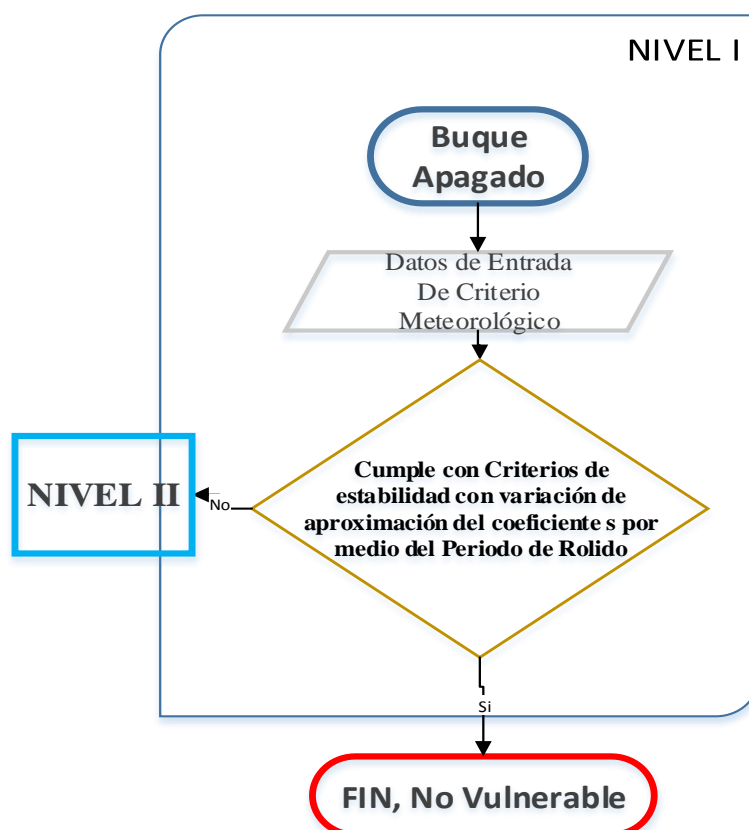


Figura 2.11 Diagrama de flujo del Nivel I de Vulnerabilidad de Buque Apagado

Reglas para la evaluación del Nivel I de Buque Apagado

En el Nivel I del modo de falla de Buque Apagado se evalúa al buque con el criterio meteorológico de los criterios de Estabilidad Intacta [9] con la diferencia del cálculo del coeficiente s que depende del periodo natural de balance. Dicho parámetro se interpola de la siguiente tabla.

| Periodo, T (s) | Factor, s |
|----------------|-----------|
| ≤6 | 0.1 |
| 7 | 0.098 |
| 8 | 0.093 |
| 12 | 0.065 |
| 14 | 0.053 |
| 16 | 0.044 |
| 18 | 0.038 |
| 20 | 0.032 |
| 22 | 0.028 |
| 24 | 0.025 |
| 26 | 0.023 |
| 28 | 0.021 |
| ≥30 | 0.02 |

Tabla 14 Valor del Factor s , en función del periodo de rolo [12]

El criterio meteorológico compara áreas bajo la curva de brazos adrizantes. Si se cumple la reglamentación de la figura 2.12, es decir si el área $b > a$, se considera no vulnerable al buque para el Nivel I de Buque Apagado de otra manera obligatoriamente debe regirse a la evaluación del Nivel II.

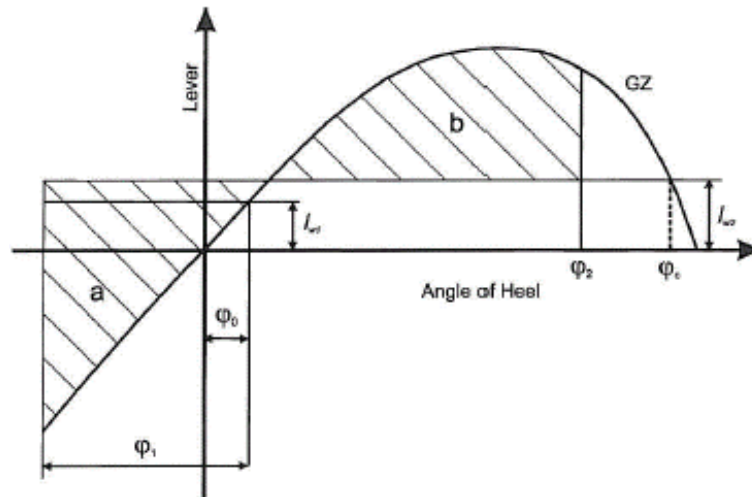


Figura 2.12 Criterio Meteorológico [9]

Implementación del Nivel I de Buque apagado

El ingreso de datos del programa de computación es por medio de una tabla de Microsoft Excel mostrada en la tabla 15. Además, se debe tener en cuenta:

- Se debe ingresar curva de brazos de brazos adrizantes para ambas condiciones de carga en aguas tranquilas. Se ingresa ángulos mayores que el máximo entre ángulo de inundación y 50 grados.

| | | | | | |
|---|--------------|---|-------------------|------|---------------|
| Eslora de flotación, L_{wl} | 42.11 | 42.11 | [m] | | |
| Manga, B | 8.014 | 8.014 | [m] | | |
| Calado, d | 4.09 | 4.43 | [m] | | |
| Alto del centro de gravedad, KG | 3.62 | 3.51 | [m] | | |
| Coefficiente Bloque, Cb | 0.568 | 0.585 | [adi] | | |
| Área proy. de quilla de balance, A_k | 0 | 0 | [m ²] | | |
| Área proyectada lateral | 195.37 | 181.0617 | [m ²] | | |
| Alto al centroide del área lateral | 6.7 | 7 | [m] | | |
| Ángulo de inundación | 60 | 60 | [°] | | |
| Teta [°] | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | GZ [m] |
| | 5.00 | 0.04 | 5.00 | 0.05 | |
| | 10.00 | 0.08 | 10.00 | 0.10 | |
| | 20.00 | 0.16 | 20.00 | 0.16 | |
| | 30.00 | 0.19 | 30.00 | 0.19 | |
| | 40.00 | 0.22 | 40.00 | 0.23 | |
| | 50.00 | 0.23 | 50.00 | 0.24 | |
| | 60.00 | 0.20 | 60.00 | 0.22 | |
| | 70.00 | 0.14 | 70.00 | 0.19 | |
| 80.00 | 0.08 | 80.00 | 0.15 | | |
| Condición 1 Salida de Puerto | | Condición 2 Llegada a Puerto | | | |

Tabla 15 Datos de Ingreso para el Nivel I de Buque Apagado

Dentro de los cálculos del criterio meteorológico se desarrolla un polinomio de quinto orden para aproximar la curva de brazos adrizantes en función del ángulo de escora (figura 2.13). Se usa dicha función polinómica para realizar cálculos de ángulos para brazos escorantes dados y áreas bajo la curva de brazos adrizantes. Para el cálculo de altura metacéntrica, únicamente se toman los valores de GZ de cero a diez grados para desarrollar una estimación de la pendiente en el origen.

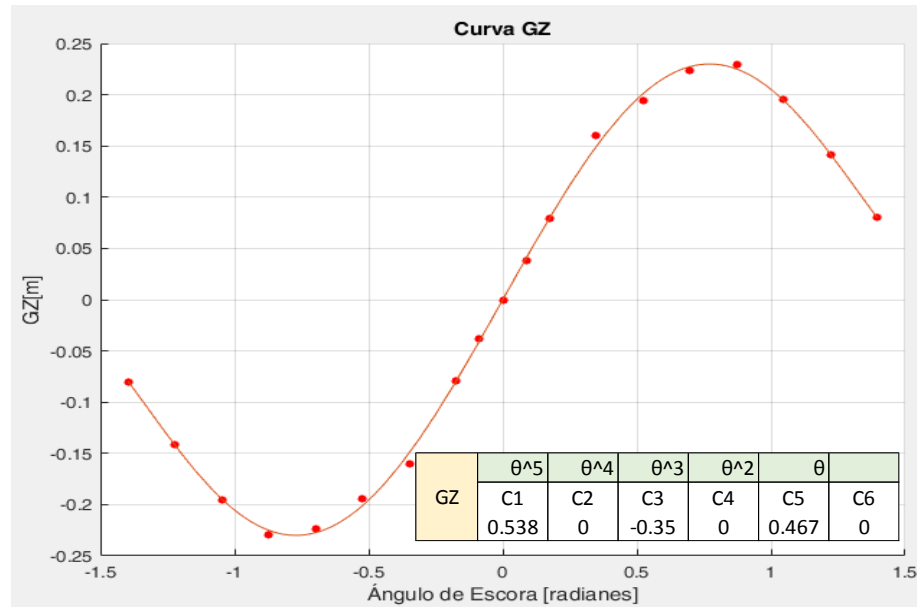


Figura 2.13 Coeficientes de ajuste de curva de brazos adrizantes (GZ)

Resultados del Nivel I de Buque Apagado

El programa muestra en una tabla Excel (tabla 16) los datos de la condición de carga y la evaluación del criterio meteorológico de estabilidad. Los resultados de la tabla 16 muestran la evaluación del Nivel I de vulnerabilidad en el modo de Buque Apagado en la primera condición de carga. La evaluación de la segunda condición de carga se muestra en el anexo 1.

| Condición de Carga Evaluada | | 1 | Unidades |
|--|------------|----------------------|----------|
| $lw1$ | | 0.08 | [m] |
| $lw2$ | | 0.13 | [m] |
| $\varphi0$ | | 10.5 | [°] |
| $Vd-V/Aw(D-d)<1$ | k | 0.7 | - |
| | $X1$ | 0.75 | - |
| | $X2$ | 0.915 | - |
| | r | 0.661 | - |
| | T | 7.951 | [s] |
| | s | 0.093 | - |
| | $\varphi1$ | 13.0 | [°] |
| $\varphi2$ | | 50.0 | [°] |
| Área a | | 0.023 | [m-rad] |
| Área b | | 0.044 | [m-rad] |
| No es Vulnerable si Área b >= Área a | | No Vulnerable | |

Tabla 16 Resultados de Buque Apagado (Nivel I: Salida de Puerto)

En la figura 2.14 y figura 2.15 se evidencia la curva de brazos adrizantes para ambas condiciones en donde el área b es mayor al área a . Finalmente de acuerdo a los resultados para ambas condiciones de carga el buque ha cumplido con el criterio meteorológico, es decir no hay la necesidad de evaluar el Nivel II del modo de falla para Buque Apagado.

El barco atunero no es proclive a la zozobra por Buque Apagado, debido a que tiene períodos de rolo menor a 20 segundos (para ambas condiciones de carga), y para ello, en el Nivel I de vulnerabilidad se evalúa de la misma manera que el criterio meteorológico que ya ha sido aprobado por la embarcación.

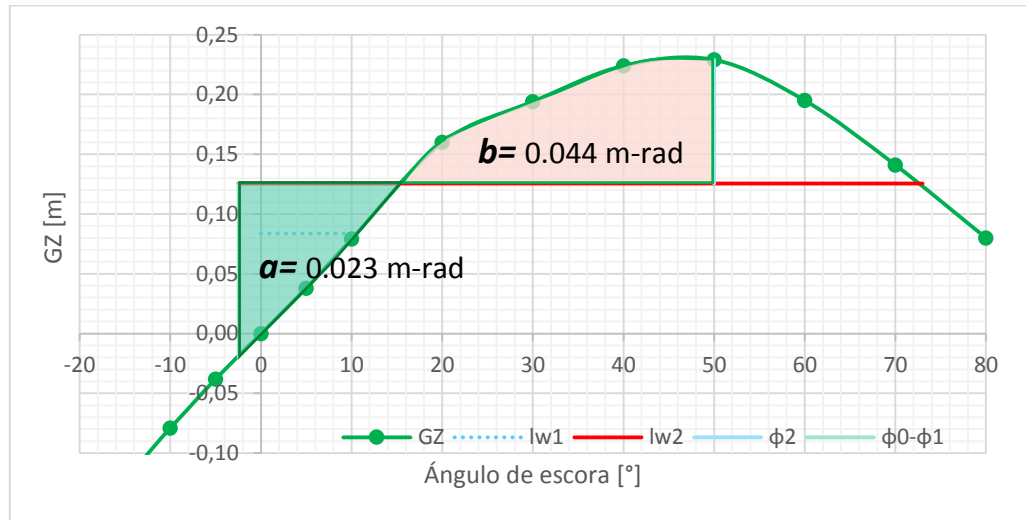


Figura 2.14 Criterio Meteorológico para la condición Salida de Puerto

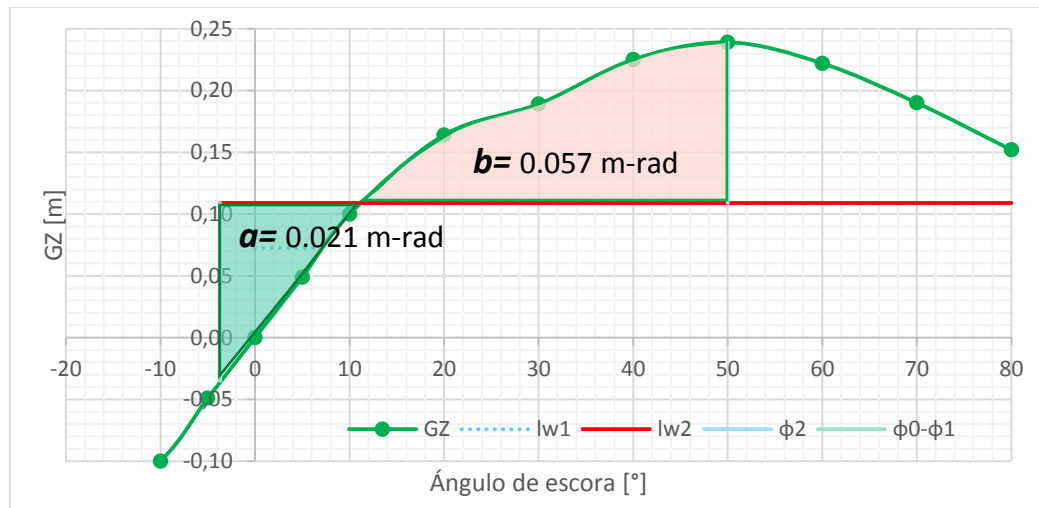


Figura 2.15 Criterio Meteorológico para la condición Llegada a Puerto

Finalmente se ha aprobado el Nivel I de todos los modos de falla a excepción de Navegación sobre la cresta de la Ola, por lo cual la OMI obligatoriamente presenta la evaluación del siguiente de nivel para ese modo de falla.

CAPÍTULO 3

3. NIVEL II DE NAVEGACIÓN SOBRE LA CRESTA DE LA OLA/GUIÑADA SÚBITA

Siguiendo el esquema de la Segunda Generación de criterios de estabilidad, si un buque no aprueba el Nivel I es obligatorio realizar la evaluación del Nivel II. En el presente caso, el modo de zozobra que debe evaluarse en el Nivel II es la Navegación sobre la cresta de la Ola/Guiñada Súbita y con ello realizar la implementación en un programa computacional. Para este cálculo se realiza el mismo procedimiento de lectura e impresión de resultados que el del Nivel I de todos los modos de falla, empleando archivos en formato Excel (Capítulo 2). Las referencias utilizadas para la reglamentación por el Subcomité de Diseño y Construcción de Buques (SDC) de la OMI de este modo de falla son:

- Reglamentos del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola: ANNEX 3, SDC 2/WP.4, 2015 [18].
- Correcciones del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola: GENERAL, SDC 3/WP.5, 2016 [12]
- Notas Explicativas del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola: ANNEX 5, SDC 3/WP.5, 2016 [12]

En el diagrama de flujo de la figura 3.1 se presenta la implementación de la evaluación de la vulnerabilidad del Nivel II del modo de falla de Navegación sobre la cresta de la Ola. En la figura se observa que la evaluación influye dos condicionales que consideran la altura y periodo promedio de ola. El proceso finaliza con una sumatoria de todos del parámetro C dependientes a valores de una sección Analítica, lo cual calcula la posibilidad de zozobra.

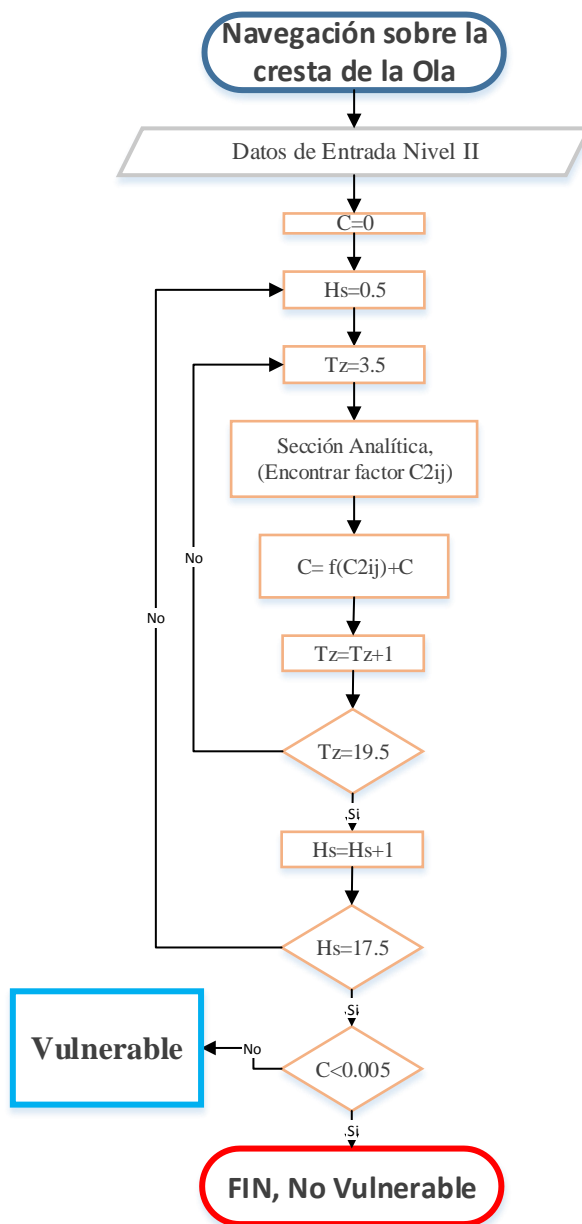


Figura 3.1 Evaluación del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la ola para las dos condiciones de carga

3.1 Reglamentación del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola

Para evaluar a Nivel II la posibilidad de zozobra en el modo de falla de Navegación sobre la cresta de la Ola en la figura 3.1 se muestra la importancia de encontrar los valores de $C2_{ij}$. Por ello, los reglamentos para encontrar los coeficientes $C2_{ij}$ son llamados Sección Analítica; en cambio, la otra sección llamada Probabilística, es usada para obtener el parámetro C por medio de tablas de ponderación dependientes de los casos de cada ola y los valores de $C2_{ij}$.

Sección Analítica

La reglamentación encuentra el coeficiente $C2_{ij}$ por medio del condicional 3.1, dependiente del número de Froude de servicio del barco (F_n) comparado con un número de Froude crítico ($F_{n_{cr}}$) que se calcula en características de ola regular a s_i y r_j .

$$C2_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } F_n > F_{n_{cr}}(r_j, s_i) \\ 0 & \text{si } F_n \leq F_{n_{cr}}(r_j, s_i) \end{cases} \quad (3.1)$$

donde,

$F_{n_{cr}} = u_{cr} / \sqrt{Lg}$, número Froude Crítico correspondiente al límite de navegación sobre de la cresta de la ola, calculado en olas regulares,

r_i , razón longitud de la ola con la eslora del buque (“*wavelength to ship length ratio*”), de 0.03 hasta 0.15 con incrementos de $\Delta r=0.0012$,

s_j , razón altura con longitud de la ola (“*wave steepness*”), de 1.0 hasta 3.0 con incrementos de $\Delta s=0.025$, y,

u_{cr} , (m/s) velocidad critica del buque calculada resolviendo la ecuación 3.2 de acuerdo a una velocidad de rotación critica (n_{cr}).

Entonces para determinar los coeficientes C_{2ij} por medio del número de Froude en olas (con características s_j y r_i), es necesario encontrar la velocidad crítica resolviendo la siguiente ecuación del equilibrio en x:

$$T_e(u_{cr}; n_{cr}) - R(u_{cr}) = 0 \quad , \quad (3.2)$$

donde,

$R(u_{cr})$, es la resistencia al avance en aguas tranquilas en función de u_{cr} ,

$T_e(u_{cr}; n_{cr})$, empuje generado por el propulsor en aguas tranquilas en función de n_{cr} y u_{cr} , donde a su vez,

n_{cr} , velocidad de rotación del propulsor correspondiente al límite de navegación sobre la cresta de la ola.

Para resolver la ecuación 3.2 es necesario encontrar el n_{cr} por medio de la ecuación 3.3 dependiente de las características de la ola de s_j y r_i . En esta ecuación se incluyen factores dependientes de las características de la ola y propulsivas del buque. La ecuación 3.3 se explica en detalle en el anexo 3.

$$2\pi \frac{T_e(c_i, n_{cr}) - R(c_i)}{f_{ij}} + F(M, M_x, f_{ij}, k_i, c_i, \kappa_{0,1,2}, r_{0,1,2,3,4,5}) = 0 \quad , \quad (3.3)$$

donde,

M , (kg) masa de desplazamiento del buque,

M_x , (kg) masa añadida del buque que puede ser asumido como 0.1 de M ,

f_{ij} , (N) amplitud de la fuerza generada por ola,

$k_i = 2\pi / r_i L$, (1/m) número de la ola,

$c_i = \sqrt{g / k_i}$, (1/m) celeridad de la ola,

$k_{0,1,2}$, coeficientes de interpolación del polinomio de segundo orden del coeficiente de empuje en aguas tranquilas, y,

$r_{0,1,2,3,4,5}$, coeficientes de interpolación del polinomio de quinto orden de la resistencia al avance en aguas tranquilas.

La amplitud de la fuerza generada por la ola puede ser estimada de la siguiente manera:

$$f_{ij} = 0.5 \rho g k_i H_{ij} \sqrt{F_c^2 + F_s^2} \quad (N), \quad (3.4)$$

donde,

$H_{ij} = s_j r_i L$, (m) altura de la ola,

F_c y F_s son las componentes de Froude-Krylov de las fuerza de la ola, estimadas con las siguientes formulaciones:

$$F_c = \sum_{i=1}^N \Delta x_i S(x_i) \sin(k_i x_i) \exp(-0.5 k_i d(x_i)) \quad (m^3) \quad , \quad (3.5)$$

$$F_s = \sum_{i=1}^N \Delta x_i S(x_i) \cos(k_i x_i) \exp(-0.5 k_i d(x_i)) \quad (m^3) \quad , \quad (3.6)$$

donde,

x_i , (m) distancia longitudinal desde sección media (positivo hacia proa),

$D(x_i)$, (m) calado por cada estación en aguas tranquilas i,

$S(x_i)$, (m^2) área sumergida de cada porción de estación en aguas tranquilas i, y,

N , número de estaciones.

Sección Probabilística

Según la regulación de la OMI el buque no es vulnerable a este modo de falla, Navegación sobre la cresta de la ola, si el parámetro de la ecuación 3.7 es menor a 0.005. Para obtener esta norma es necesario disponer los valores del coeficiente de $C2_{ij}$ descritos en la Sección Analítica. Además, en la ecuación 3.7 intervienen factores de ponderación por ocurrencia del oleaje.

$$C = \sum_{HS} \sum_{TZ} \left(W2(H_S, T_Z) \frac{\sum_{j=1}^{Ns_j} \sum_{i=1}^{Nr_i} W_{ij} C2_{ij}}{\sum_{j=1}^{Ns_j} \sum_{i=1}^{Nr_i} W_{ij}} \right), \quad (3.7)$$

Esta ecuación fue propuesta en SDC 2 [18] pero al siguiente año en el SDC 3 [12], se presenta la siguiente versión del cálculo del coeficiente C , que es la que se usa en este trabajo:

$$C = \sum_{HS} \sum_{TZ} \left(W2(H_S, T_Z) \sum_{j=1}^{Ns_j} \sum_{i=1}^{Nr_i} W_{ij} C2_{ij} \right), \quad (3.8)$$

donde,

$W2(H_s, T_z)$, factor de ponderación del estado de mar a corto plazo en función de la altura significativa y el periodo de la ola (tabla 17), y,

W_{ij} , ponderación estadística de la ola en función de s_j y r_i , con una discretización de Ns_j igual a 100 y Nr_i igual a 80. Su evaluación se hace aplicando la ecuación 3.8.

| Número de ocurrencias: 100 000 / Tz [s] = periodo de la ola promedio | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| Hs [m] | 3.5 | 4.5 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 8.5 | 9.5 | 10.5 | 11.5 | 12.5 | 13.5 | 14.5 | 15.5 | 16.5 | 17.5 | 18.5 |
| 0.5 | 1.3 | 133.7 | 865.6 | 1186 | 634.2 | 186.3 | 36.9 | 5.6 | 0.7 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.5 | 0 | 29.3 | 986 | 4976 | 7738 | 5569.7 | 2375.7 | 703.5 | 160.7 | 30.5 | 5.1 | 0.8 | 0.1 | 0 | 0 | 0 |
| 2.5 | 0 | 2.2 | 197.5 | 2158.8 | 6230 | 7449.5 | 4860.4 | 2066 | 644.5 | 160.2 | 33.7 | 6.3 | 1.1 | 0.2 | 0 | 0 |
| 3.5 | 0 | 0.2 | 34.9 | 695.5 | 3226.5 | 5675 | 5099.1 | 2838 | 1114.1 | 337.7 | 84.3 | 18.2 | 3.5 | 0.6 | 0.1 | 0 |
| 4.5 | 0 | 0 | 6 | 196.1 | 1354.3 | 3288.5 | 3857.5 | 2685.5 | 1275.2 | 455.1 | 130.9 | 31.9 | 6.9 | 1.3 | 0.2 | 0 |
| 5.5 | 0 | 0 | 1 | 51 | 498.4 | 1602.9 | 2372.7 | 2008.3 | 1126 | 463.6 | 150.9 | 41 | 9.7 | 2.1 | 0.4 | 0.1 |
| 6.5 | 0 | 0 | 0.2 | 12.6 | 167 | 690.3 | 1257.9 | 1268.6 | 825.9 | 386.8 | 140.8 | 42.2 | 10.9 | 2.5 | 0.5 | 0.1 |
| 7.5 | 0 | 0 | 0 | 3 | 52.1 | 270.1 | 594.4 | 703.2 | 524.9 | 276.7 | 111.7 | 36.7 | 10.2 | 2.5 | 0.6 | 0.1 |
| 8.5 | 0 | 0 | 0 | 0.7 | 15.4 | 97.9 | 255.9 | 350.6 | 296.9 | 174.6 | 77.6 | 27.7 | 8.4 | 2.2 | 0.5 | 0.1 |
| 9.5 | 0 | 0 | 0 | 0.2 | 4.3 | 33.2 | 101.9 | 159.9 | 152.2 | 99.2 | 48.3 | 18.7 | 6.1 | 1.7 | 0.4 | 0.1 |
| 10.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.2 | 10.7 | 37.9 | 67.5 | 71.7 | 51.5 | 27.3 | 11.4 | 4 | 1.2 | 0.3 | 0.1 |
| 11.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 3.3 | 13.3 | 26.6 | 31.4 | 24.7 | 14.2 | 6.4 | 2.4 | 0.7 | 0.2 | 0.1 |
| 12.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 1 | 4.4 | 9.9 | 12.8 | 11 | 6.8 | 3.3 | 1.3 | 0.4 | 0.1 | 0 |
| 13.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 1.4 | 3.5 | 5 | 4.6 | 3.1 | 1.6 | 0.7 | 0.2 | 0.1 | 0 |
| 14.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.4 | 1.2 | 1.8 | 1.8 | 1.3 | 0.7 | 0.3 | 0.1 | 0 | 0 |
| 15.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0 |
| 16.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 17 Ocurrencia de casos de oleaje

$$W_{ij} = \frac{4\sqrt{g} L^{5/2} T_{01}}{\pi v H_s^3} s_j^2 r_i^{3/2} \left(\frac{\sqrt{1+v^2}}{1+\sqrt{1+v^2}} \right) \Delta r \Delta s \exp \left[-2 \left(\frac{L r_i s_j}{H_s} \right)^2 \left\{ 1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \sqrt{\frac{g T_{01}^2}{2 \pi r_i L}} \right)^2 \right\} \right],$$

(3.9)

donde,

v , 0.4256,

T_{01} , (s) igual a 1.086 T_z ,

T_z , (s) periodo de la ola promedio (tabla 17), y,

H_s , (m) altura significativa de la ola (tabla 17).

3.2 Implementación del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola

Para la implementación de un programa computacional que permita evaluar la vulnerabilidad del Nivel II del modo Navegación sobre la cresta de la ola, es necesario ingresar datos de las dos condiciones de entrada del buque atunero por medio de una plantilla Excel presentada en la siguiente tabla.

| | | | | |
|-------------------|-------------|-------|-------------|-------|
| Eslora, L | 42.11 | 43.11 | [m] | |
| Desplazamiento | 802.8 | 895.6 | [ton] | |
| Velocidad | 12 | 12 | [nudos] | |
| Diám. del prop. | 1.9 | 1.9 | [m] | |
| Paso/Diam | 0.73 | 0.73 | - | |
| Ae/Ao | 0.6 | 0.6 | - | |
| #Palas | 4 | 4 | - | |
| Velo. de rotación | 350 | 350 | [rpm] | |
| Factor de estela | 0.3 | 0.3 | [adi] | |
| Factor de Empuje | 0.23 | 0.23 | [adi] | |
| | 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.0 |
| | 3.00 | 367.6 | 3.00 | 386.7 |
| | 3.50 | 490.2 | 3.50 | 515.6 |
| | 4.50 | 781.6 | 4.50 | 822.5 |

| | | | | | |
|------------------------------|--------------|-------------------------|--------------|---------|-----------------------------|
| Velocidad [nudos] | 5.00 | 949.7 | 5.00 | 999.7 | Resistencia [kg] |
| | 5.50 | 1133.0 | 5.50 | 1193.0 | |
| | 6.50 | 1547.0 | 6.00 | 1403.0 | |
| | 7.80 | 2220.0 | 7.20 | 1995.0 | |
| | 8.45 | 2643.0 | 7.80 | 2358.0 | |
| | 9.10 | 3153.0 | 8.40 | 2785.0 | |
| | 9.75 | 3757.0 | 9.00 | 3303.0 | |
| | 10.40 | 4503.0 | 9.60 | 3924.0 | |
| | 11.05 | 5527.0 | 10.20 | 4654.0 | |
| | 11.70 | 6797.0 | 10.80 | 5621.0 | |
| | 13.00 | 9149.0 | 12.00 | 8503.0 | |
| | 14.30 | 11870.0 | 13.20 | 11150.0 | |
| | 14.95 | 14140.0 | 13.80 | 12420.0 | |
| | 15.60 | 17420.0 | 14.40 | 14090.0 | |
| | 16.25 | 20530.0 | 15.00 | 16510.0 | |
| | 17.55 | 26390.0 | 16.20 | 23190.0 | |
| | 18.20 | 29580.0 | 16.80 | 25980.0 | |
| | 19.50 | 36390.0 | 18.00 | 32190.0 | |
| | 20.00 | 41040.0 | 20.00 | 45620.0 | |
| | 21.00 | 47420.0 | 21.00 | 52590.0 | |
| | 21.50 | 50710.0 | 21.50 | 56180.0 | |
| | 22.00 | 54570.0 | 22.00 | 60690.0 | |
| | 23.50 | 66230.0 | 23.50 | 75040.0 | |
| | 24.00 | 69730.0 | 24.00 | 79360.0 | |
| | 24.50 | 72990.0 | 24.50 | 83460.0 | |
| | 25.00 | 76050.0 | 25.00 | 87320.0 | |
| | 25.50 | 78930.0 | 25.50 | 90960.0 | |
| | 26.00 | 81660.0 | 26.00 | 94410.0 | |
| | 26.50 | 84260.0 | 26.50 | 97710.0 | |
| 27.00 | 86770.0 | 27.00 | 100900.0 | | |
| 27.50 | 89200.0 | 27.50 | 104000.0 | | |
| 28.00 | 91580.0 | 28.00 | 107000.0 | | |
| 28.50 | 93930.0 | 28.50 | 109900.0 | | |
| 29.00 | 96250.0 | 29.00 | 112800.0 | | |
| 29.50 | 98570.0 | 29.50 | 115800.0 | | |
| Condición 1 | | Condición 2 | | | |
| Salida de Puerto | | Llegada a Puerto | | | |

Tabla 18 Datos de ingreso para el Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola

- **Sección Analítica**

Esta sección tiene como objetivo el cálculo de los coeficientes $C2_{ij}$ y para ello, es necesario encontrar la velocidad de rotación crítica, para finalmente evaluar la velocidad crítica del buque. Luego aplicando el condicional de 3.1 se puede determinar finalmente el coeficiente $C2_{ij}$. Previo a la evaluación, el programa realiza los siguientes cálculos:

Cálculo de los coeficientes del polinomio de 5to orden de la resistencia al avance

Los valores de los coeficientes de la aproximación de un polinomio de quinto orden de la resistencia al avance son necesarias para aplicar las ecuaciones 3.3 y 3.2. Para ello, con los valores de resistencia al avance de la tabla 18 se calculan coeficientes de la aproximación polinómica de 5to orden, por medio del comando *polyfit* de MATLAB; para ello se debe especificar el vector de variables dependientes, independientes y el orden polinomial que se desea aproximar. En la figura 3.2 se muestra el polinomio aproximador con los valores de resistencia al avance con un error cuadrado de 0.9996.

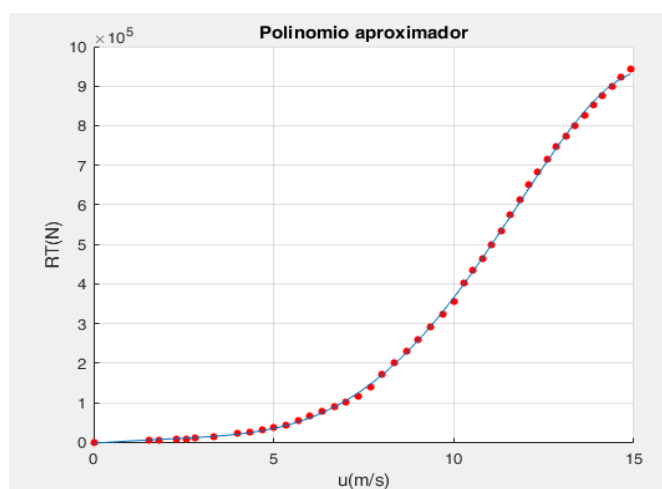


Figura 3.2 Polinomio de interpolación de 5to orden de la Resistencia al avance

Se debe mencionar que en este proyecto la resistencia al avance fue calculada por el método Holtrop-Mennen [17]. Además, la OMI en [12], enfatiza las siguientes recomendaciones:

- La resistencia al avance debe contar con velocidades hasta de 20% sobre la velocidad de operación
- Obtener valores de resistencia al avance dependientes a velocidades de rango de celeridad de las olas (c_i) y esta a su vez depende del coeficiente r_i .

Cálculo de los coeficientes de interpolación 2do orden del coeficiente de empuje (KT)

Los coeficientes de interpolación del polinomio de segundo orden de la curva KT son necesarias para las ecuaciones 3.3 y 3.2. En este proyecto se implementa un programa que usa parámetros propulsivos del buque (P/D , $A_e A_o$, *Diámetro del propulsor*) para encontrar valores del coeficiente de empuje, y luego usar el comando *polyfit* para el cálculo de los coeficientes necesarios.

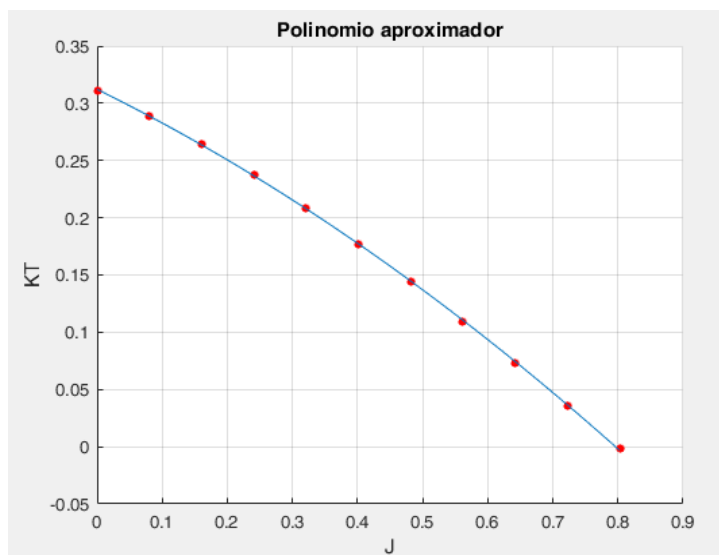


Figura 3.3 Polinomio de interpolación de 2do orden del coeficiente de empuje (KT)

Calculo de la fuerza generada por la ola (f_{ij})

El valor de la fuerza generada por la ola (f_{ij}) es necesaria para el cálculo de las revoluciones de rotación críticas de la ecuación 3.3. Para ello, se debe ingresar los valores la tabla 19 en el programa los valores de las áreas seccionales para diferentes estaciones a lo largo del buque, y, para las dos condiciones de carga. El programa evalúa los componentes de Froude Krylov (ecuaciones 3.5 y 3.7) dependiente a la condición de carga para luego calcular la fuerza generada por la ola sobre barco por medio de la ecuación 3.4.

| X=0 en Sección media y positivo hacia proa | | | | | | | |
|--|------------|-------|-------------------|------------------|------------|-------|-------------------|
| Salida de Puerto | | | | Llegada a Puerto | | | |
| x | Δx | d | S | x | Δx | d | S |
| [m] | [m] | [m] | [m ²] | [m] | [m] | [m] | [m ²] |
| 20.815 | 1.44 | 3.996 | 3.37 | 20.815 | 1.44 | 4.312 | 3.37 |
| 19.095 | 2.0 | 4.004 | 11.16 | 19.095 | 2.0 | 4.322 | 11.27 |
| 17.345 | 1.5 | 4.012 | 11.28 | 17.345 | 1.5 | 4.332 | 12.28 |
| 13.186 | 6.818 | 4.031 | 58.36 | 13.186 | 6.818 | 4.357 | 62.97 |
| 4.8905 | 9.773 | 4.068 | 123.65 | 4.8905 | 9.773 | 4.406 | 130.25 |
| -0.8205 | 1.649 | 4.094 | 23.17 | -0.8205 | 1.649 | 4.439 | 24.31 |
| -7.524 | 11.758 | 4.124 | 170.16 | -7.524 | 11.758 | 4.479 | 178.61 |
| -14.78 | 2.754 | 4.157 | 40.36 | -14.78 | 2.754 | 4.522 | 42 |
| -16.833 | 1.344 | 4.166 | 17.07 | -16.833 | 1.344 | 4.534 | 17.36 |
| -18.21 | 1.41 | 4.172 | 14.62 | -18.21 | 1.41 | 4.542 | 15.67 |
| -19.465 | 1.1 | 4.178 | 10.78 | -19.465 | 1.1 | 4.549 | 11.6 |
| -20.535 | 1.04 | 4.183 | 9.37 | -20.535 | 1.04 | 4.556 | 9.76 |

Tabla 19 Valores de área sumergida para secciones a lo largo del buque

Cálculo de la velocidad de rotación crítica (n_{cr})

Con los valores de los coeficientes de resistencia al avance, coeficiente de empuje del propulsor, fuerza genera por la ola y además de la celeridad de ola, es posible encontrar la velocidad de rotación crítica por medio de la ecuación 3.3. Para ello se toma dicha ecuación como una función donde la variable independiente es la velocidad de rotación. El n_{cr} crítico es el valor de la raíz de la función y para ello se

usa el comando *roots* de MATLAB. En la figura 3.4 se muestra la gráfica de la ecuación en donde la intersección de la función con el eje de las abscisas (raíz) es la velocidad de rotación crítica de la embarcación causado por la fuerza generada por la ola.

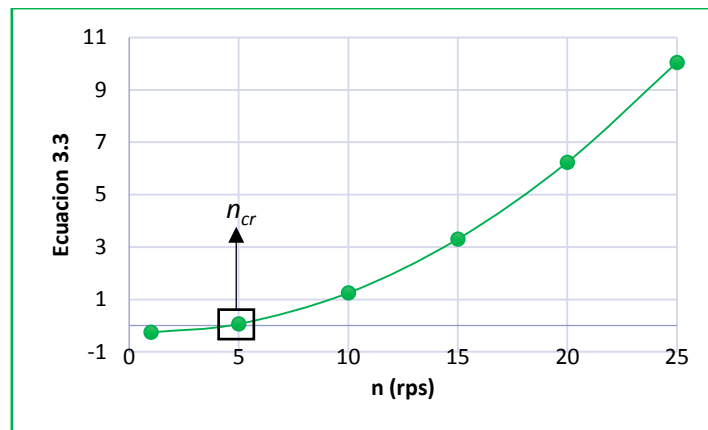


Figura 3.4 Gráfica de la ecuación 3.3 para encontrar n_{cr}

Cálculo de la velocidad crítica (u_{cr})

Una vez obtenido el valor de n_{cr} , es posible encontrar la velocidad crítica del buque como el equilibrio del empuje del propulsor y la resistencia al avance del barco (ecuación 3.2). En la figura 3.5 se muestra la gráfica de ambas funciones, aunque la metodología del programa es restar ambas funciones para que la velocidad crítica sea la intersección con el eje de las abscisas.

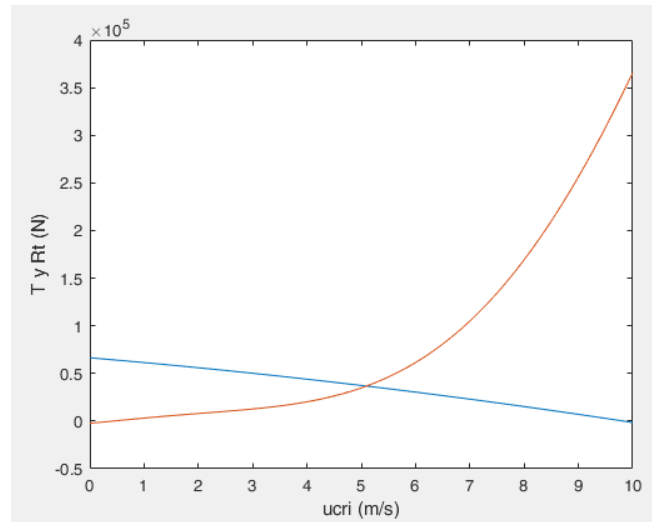


Figura 3.5 Intersección de Empuje y Resistencia al avance del buque

Cálculo de los coeficientes $C2_{ij}$

Hasta el momento se ha calculado la velocidad de rotación crítica (n_{cr}) y ahora corresponde determinar la velocidad crítica del buque. Para ello, es necesario calcular el coeficiente $C2_{ij}$ para luego aplicar el condicional 3.1. Hasta ahora, sólo lo considera de manera individual los valores $C2_{ij}$ pero es necesario encontrar una matriz del coeficiente $C2_{ij}$ que considere todas las posibilidades de s_j y r_i . En general, en la figura 3.6 se observa el resumen y la preparación de una matriz de los coeficientes $C2_{ij}$.

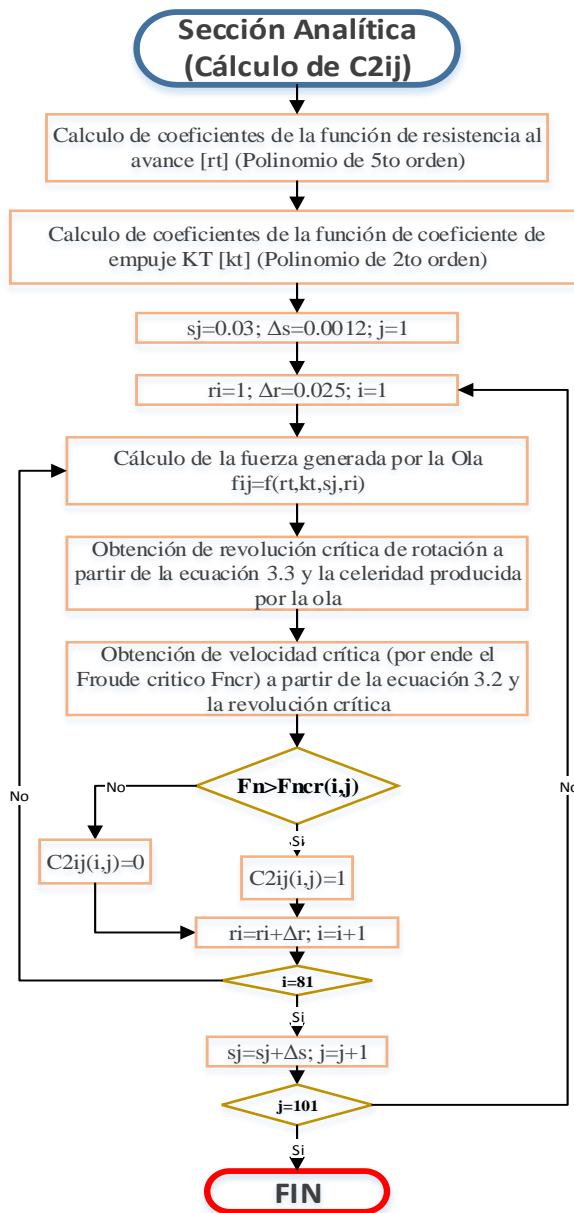


Figura 3.6 Diagrama de flujo del cálculo del coeficiente $C2_{ij}$

Finalmente en la figura 3.7 se muestra los coeficientes C_{2ij} para las combinaciones de s_j y r_i , para una velocidad de operación de 12 nudos. El sector donde el coeficiente es igual a 1 (color rojo) puede llamarse sector inseguro ya que esta incrementa la probabilidad de zozobra.

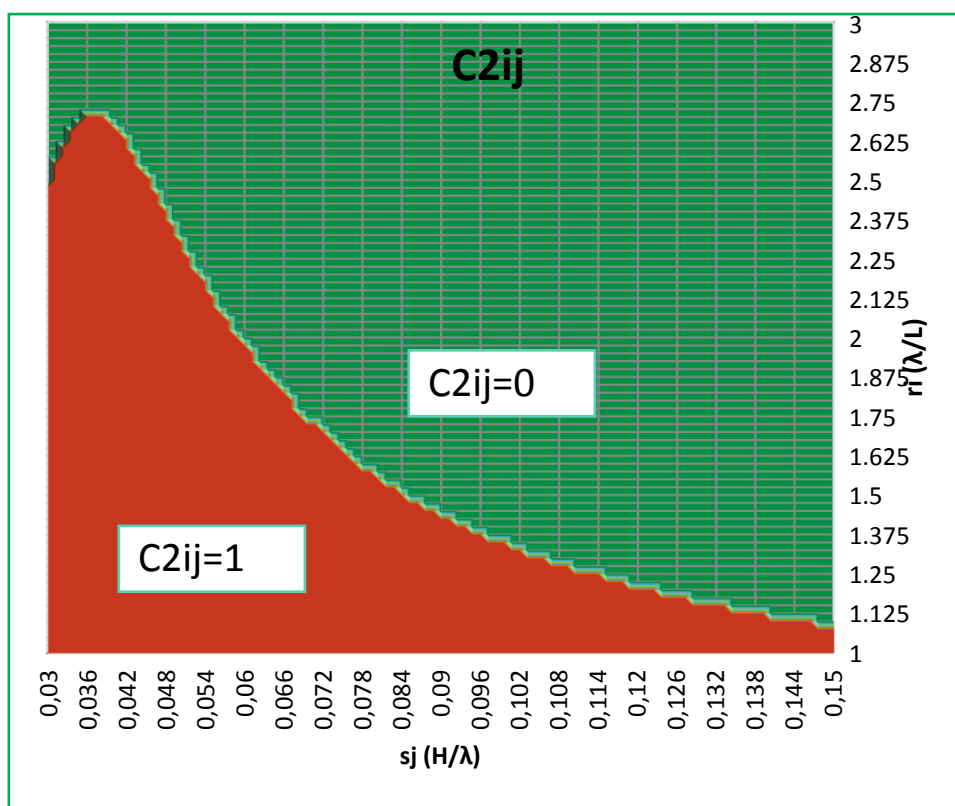


Figura 3.7 Coeficiente C_{2ij} para las combinaciones de r_i y s_j

• Sección Probabilística (Cálculo del parámetro C)

Luego de obtener los valores de la matriz C_{2ij} es posible calcular el parámetro C (determina la vulnerabilidad del buque) por medio de la ecuación 3.8. En ella, usan los valores de ponderación de $W_2(H_s, T_z)$ (tabla 17) y W_{ij} (ecuación 3.9) en conjunto de los valores de C_{2ij} . En general, la metodología de evaluación del parámetro C a partir de la matriz C_{2ij} se presenta en la figura 3.9. Finalmente en la tabla 20 se encuentra el resultado de la evaluación coeficiente de C, comparándolo con el límite máximo de vulnerabilidad.

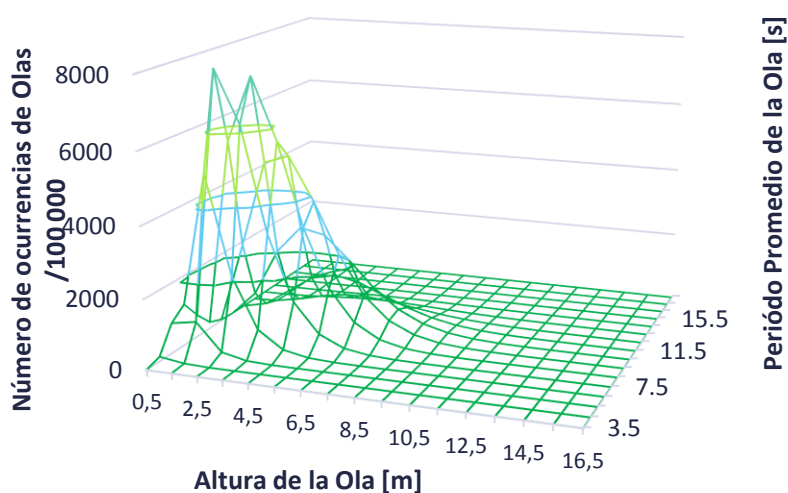


Figura 3.8 Ponderación de ocurrencias de olas

| | |
|--|-------------------|
| Velocidad de Nav. | 12 nudos |
| C | 0.0054 |
| Límite máximo de vulnerabilidad | 0.005 |
| Resultado | VULNERABLE |

Tabla 20 Evaluación final del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la ola de Salida de Puerto

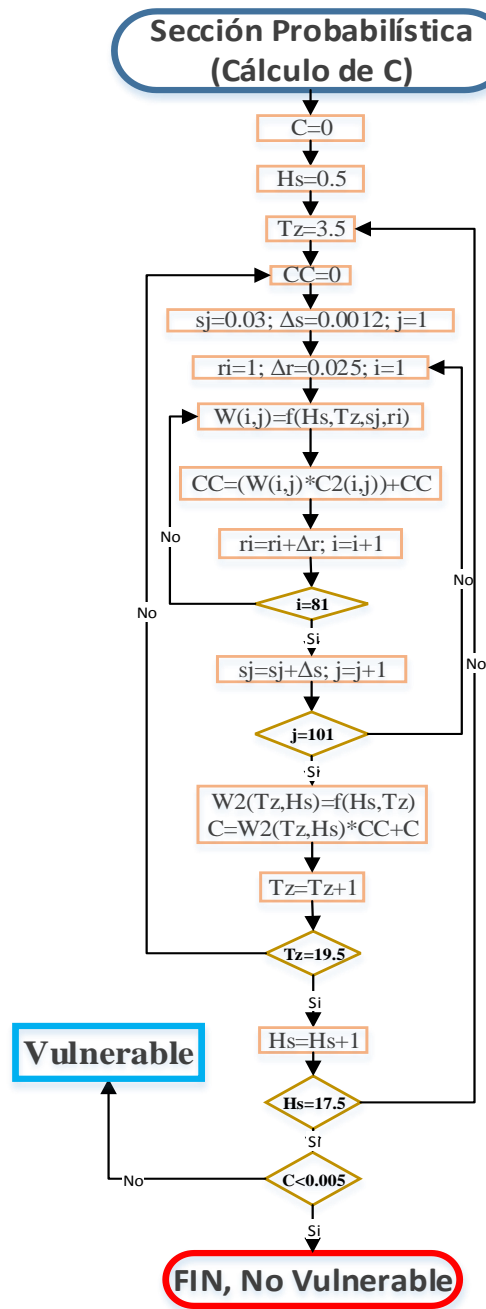


Figura 3.9 Cálculo de C de Navegación sobre la cresta de la Ola

3.3 Resultados del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola

El programa muestra en una tabla Excel (tabla 21) los datos para la condición de carga y los resultados la evaluación del Nivel II de vulnerabilidad de Navegación sobre la cresta de la Ola. En la tabla 21 se muestra la posibilidad de zozobra del buque atunero a una velocidad de operación de 12 nudos de la primera condición de carga (Salida de Puerto). El resultado de la segunda condición de carga (Llegada a Puerto) se muestra en el anexo 1.

| Condición de Carga Evaluada | | 1 | Unidades |
|--|-------|-------------------|-----------------------------------|
| Coefficientes de polinomio de interpolación resistencia $Rt[N]=v^5r_5+v^4r_4+v^3r_3+v^2r_2+vr_1+r_0$ | r_5 | -6.90 | kg s ³ /m ⁴ |
| | r_4 | 165.96 | kg s ² /m ³ |
| | r_3 | -739.84 | kg s/m ² |
| | r_2 | 873.87 | kg/m |
| | r_1 | 5114.85 | kg/s |
| | r_0 | -2263.25 | N |
| Coefficientes de polinomio de interpolación de curva KT $KT=J^2k_2+Jk_1+k_0$ | k_2 | -0.1413 | - |
| | k_1 | -0.2795 | - |
| | k_0 | 0.3121 | - |
| Velocidad de Operación | | 12.0 | nudos |
| COEFICIENTE C | | 0.0054 | |
| Es Vulnerable SI C >=0.005 | | Vulnerable | |

Tabla 21 Resultado de Navegación sobre la cresta de la Ola (Nivel II: Salida de Puerto)

Sensibilidad de resultados

La vulnerabilidad del buque a la Navegación sobre la cresta de la ola depende del número de Froude a la velocidad de operación del buque. Por ejemplo en la figura 3.11 y figura 3.10 se muestran los coeficientes C_{2ij} para 10 y 12 nudos de operación, respectivamente. Se nota la disminución del sector inseguro de C_{2ij} cuando la velocidad disminuye, es decir, la probabilidad de zozobra se reduce.

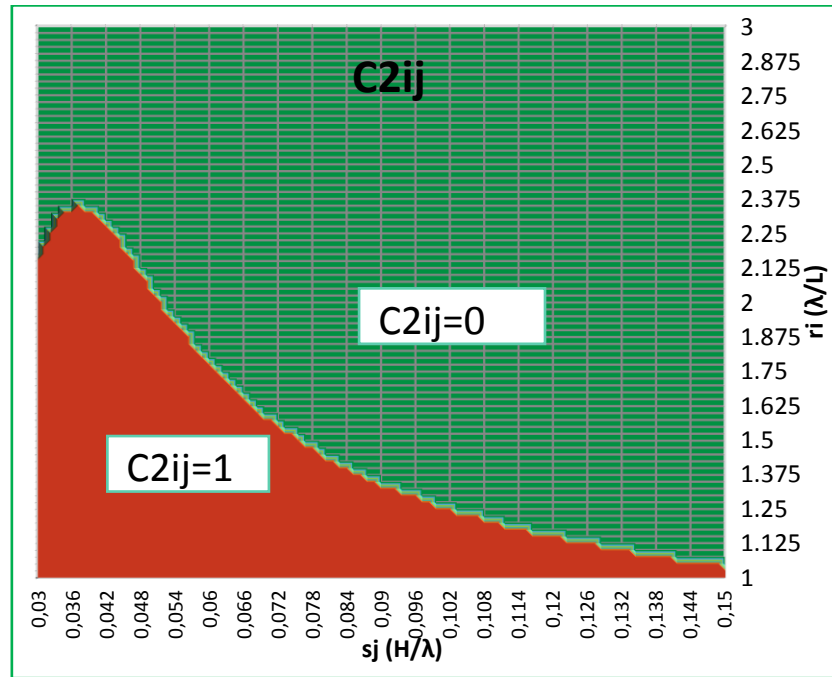


Figura 3.10 Coeficiente C_{2ij} a 12 nudos de velocidad de operación

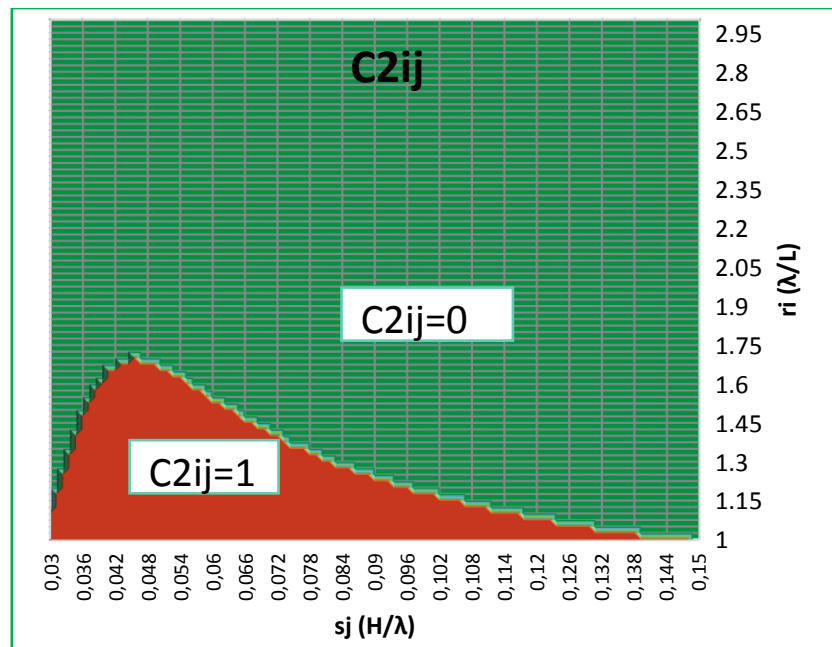


Figura 3.11 Coeficiente C_{2ij} a 10 nudos de velocidad de operación

En la tabla 22 se muestran los resultados de la evaluación a Nivel II de la Navegación sobre la cresta de la ola, para ambas condiciones de carga a diferentes velocidades de operación. Finalmente la información de la tabla 22 es presentada en forma gráfica en la figura 3.12. Es notorio que el buque atunero es proclive a la zozobra a partir de alrededor de 12 nudos de velocidad de operación, además la situación más peligrosa se presenta cuando se tiene menor desplazamiento, es decir en la condición de salida de puerto.

| Condición de Carga | Salida de Puerto | | Llegada a Puerto | |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | <i>C</i> | <i>Resultado</i> | <i>C</i> | <i>Resultado</i> |
| Velocidad de operación [nudos] | | | | |
| 10 | 0.00066 | No vulnerable | 0.000025 | No vulnerable |
| 11 | 0.00322 | No vulnerable | 0.0027 | No vulnerable |
| 12 | 0.0054 | Vulnerable | 0.005 | Vulnerable |
| 13 | 0.0077 | Vulnerable | 0.0072 | Vulnerable |

Tabla 22 Evaluación Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola

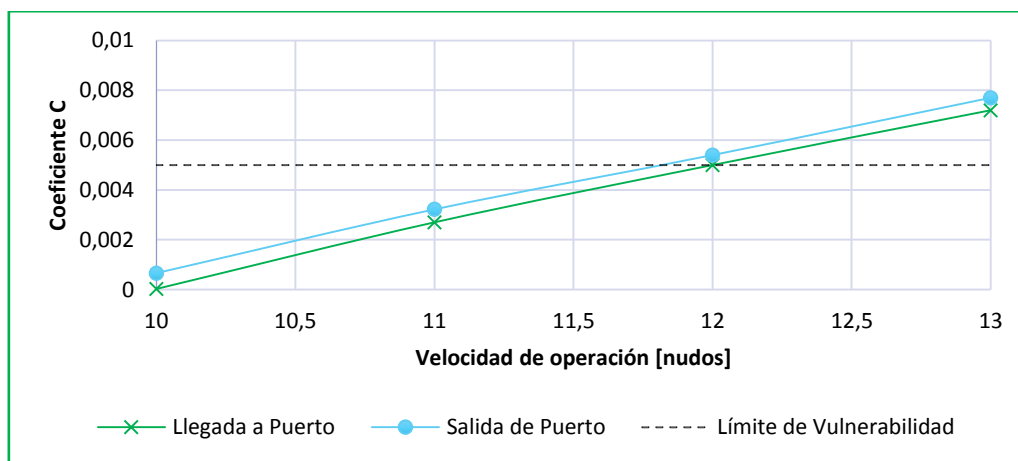


Figura 3.12 Resumen de Resultados del Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola

Finalmente, en la siguiente figura se resumen los resultados de la evaluación según los criterios de la Segunda Generación de Estabilidad de un buque atunero de 45 metros de eslora:

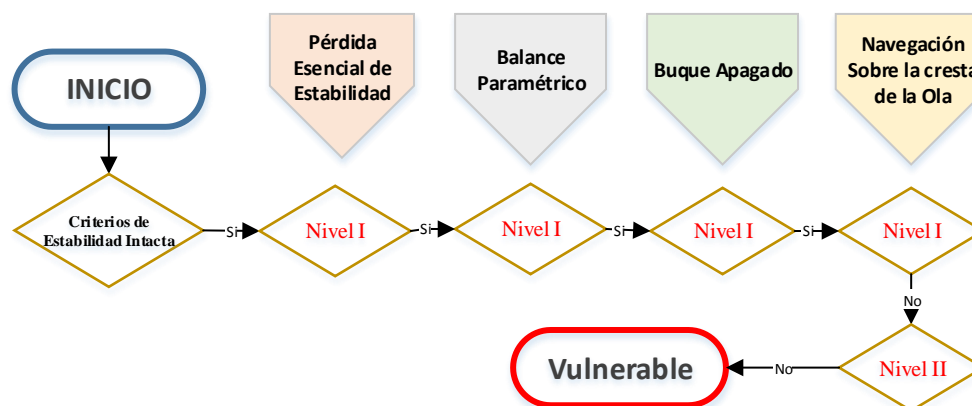


Figura 3.13 Resumen de resultado de evaluación de la Segunda Generación de Estabilidad de un buque atunero

CONCLUSIONES

Se aplicó las formulaciones de la Segunda Generación de Criterios de Estabilidad Intacta de Buques que se encuentra en desarrollo por la OMI, a una embarcación atunera que zozobró alrededor de las Islas Galápagos. La normativa mencionada requiere la evaluación de la vulnerabilidad al primer nivel, de los cuatro modos de zozobra, y si este resultado lo exige, proceder a su evaluación en el segundo nivel. Luego del análisis de la embarcación, en dos condiciones de carga, se puede concluir lo siguiente:

1. En el Nivel I, La embarcación analizada no es vulnerable en los modos de falla de Pérdida Esencial de Estabilidad, Balance Paramétrico y Buque Apagado. Esto debido a que el buque en el Nivel I de vulnerabilidad cuenta con un valor significativo para evitar la posible zozobra en los dos primeros modos de falla, y un periodo de rolido menor a 20 segundos para Buque Apagado en las dos condiciones de carga.
2. En el Nivel I de Navegación sobre la Cresta de la Ola en el que únicamente es necesario evaluar el número de Froude de la embarcación, no satisfizo la vulnerabilidad, por consiguiente lo lleva a la evaluación del segundo nivel.
3. En el nivel II, el buque atunero ecuatoriano si es vulnerable a la zozobra por Navegación sobre la Cresta de la Ola a partir de 12 nudos de velocidad. Esto concuerda con los resultados la simulación del mismo modo de falla que se desarrolló para un buque en mar regular de la referencia [7].

RECOMENDACIONES

1. De la referencia [1] se tiene como información informal que el buque previo a la zozobra, recibió dos olas desde una dirección de 45 grados de la popa. De manera que convendría realizar una simulación en tiempo de este posible modo de zozobra que combina la Navegación en cresta de la ola con el efecto de ola en el costado.
2. Aunque no era necesario el cálculo del segundo nivel para los modos de falla de Buque apagado, Balance Paramétrico y Pérdida Esencial de Estabilidad, es recomendable realizar la implementación de un programa computacional que evalúe los modos de falla restantes. Esto dado que en [1], [2] y [16] se encontró que algunos buques pesqueros pueden ser vulnerables al nivel II, a pesar de que han pasado el primero.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diario El Universo, «Se confirman dos muertes por naufragio de barco pesquero en Galápagos,» 6 Abril 2012. [En línea]. Available: <http://www.eluniverso.com/2012/04/06/1/1447/confirman-dos-muertes-naufragio-barco-pesquero-galapagos.html>.
- [2] Diario El Universo, «Barco pesquero de Manta zozobró en altamar,» 2 Mayo 2014. [En línea]. Available: <http://www.eluniverso.com/noticias/2014/05/02/nota/2910206/barco-pesquero-manta-zozobro-altamar>.
- [3] OMI SFL 51/WP.2, «Revision of the intact stability code - Report of the working group,» vol. Part 1, London, UK, Julio 2008.
- [4] M. Míguez González, V. Díaz Casás, L. Pérez Rojas, D. Pena Agras y F. Junco Ocampo, «Investigation of the Applicability of the IMO Second Generation Intact Stability Criteria to Fishing Vessels,» de *International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Glasgow, UK, Junio 2015.
- [5] F. Mata Álvarez y L. Pérez Rojas, «Application of IMO Second Generation Intact Stability Criteria for Dead Ship Condition to Small Fishing Vessels», *Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Glasgow, UK, Junio 2015.
- [6] M. S. Sotelo y J. R. Marín López, «Numerical simulation of the parametric roll of a 45 m Equadorian fishing vessel», *2016 SNAME Maritime Convention*, Bellevue, Washington, Noviembre 2016.
- [7] D. A. Vásquez A. y J. R. Marín L., «Simulación numérica del fenómeno de Surf-riding en olas regulares de un buque atunero ecuatoriano de 45 m», *II CONGRESO NACIONAL – CINMARA Tech 2016*, Manta, Ecuador, 2016.
- [8] V. Belenky, C. C. Bassler y K. J. Spyrov, «Development of Second Generation Intact Stability», *Naval Surface Warfare Center Carderock Division*, West Bethesda, Diciembre 2011.

- [9] IMO MSC.267(85), «Adoption of the International Code on Intact Stability,» 2008.
- [10] IMO SDC1/INF.8, «DEVELOPMENT OF SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA,» de *Information collected by the Correspondence Group on Intact Stability regarding the second generation intact stability criteria development*, Japan, Noviembre 2013.
- [11] G. Bulian, «Second Generation Intact General Overview,» de *Seminario de Advanced Dynamics and Safety of Ships*, ESPOL, Mayo 2014.
- [12] IMO SDC3/WP.5, «FINALIZATION OF SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA,» de *AMENDMENTS TO PART B OF THE 2008 IS CODE ON TOWING, LIFTING AND ANCHOR HANDLING OPERATIONS*, Enero 2016.
- [13] M. Santos Neves, W. M. Cipriano, C. Rodríguez y J. A. Merino, «SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.shipjournal.co/index.php/sst/article/view/18/94>. [Último acceso: Julio 2017].
- [14] J. R. de Larrucea, *Seguridad en Buques Pesqueros*, Catalunya, España, Abril 2009.
- [15] SPTM, Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial, *Estadísticas de Buques pesqueros*, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [16] Diario El Universo, «Diario El Unierso,» 08 Agosto 2017. [En línea]. Available: <http://www.eluniverso.com/noticias/2017/08/08/nota/6320863/barco-pesquero-manta-zozobra-frente-galapagos>. [Último acceso: 10 Agosto 2017].
- [17] J. Holtrop y G. Mennen, «An aproximate power prediction method» *International Shipbuilding Progress*, 1982.
- [18] IMO SDC2/WP.4, «DEVELOPMENT OF SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA,» Febrero 2015.

ANEXOS

ANEXO 1

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD PARA LA SEGUNDA CONDICIÓN DE CARGA

En los capítulos 1 y 2 se muestran los resultados de las evaluaciones del Nivel I de vulnerabilidad del modo de falla de Pérdida esencial de estabilidad, Balance Paramétrico y Buque Apagado, y, el Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola de la primera situación de carga (Salida de Puerto). En este anexo se presentan los resultados de evaluaciones en la segunda condición de carga, Llegada a Puerto:

- Tabla 23: El buque no es vulnerable para el Nivel I de Pérdida Esencial de Estabilidad.
- Tabla 24: El buque no es vulnerable para el Nivel I de Balance Paramétrico.
- Tabla 25: El buque no es vulnerable para el Nivel I de Buque Apagado.
- Tabla 26: El buque no es vulnerable para el Nivel II de Navegación sobre la cresta de la Ola.

| Condición de Carga Evaluada | | 2 | Unidades | |
|--|--------------------------------------|----------------------|-------------------|-----|
| Vd-V/Aw(D-d)>=1 | Calado mínimo, dL | 3.73 | [m] | |
| | Inercia al calado mínimo, I (dL) | 6883.43 | [m ⁴] | |
| | GMmin | 7.025 | [m] | |
| Vd-V/Aw(D-d)<1 | Longitud de la Ola, λ | 42.11 | [m] | |
| | Altura de la Ola, H | 1.41 | [m] | |
| | GMT (λ, H) | 0.9 L | 0.602 | [m] |
| | | 0.8 L | 0.647 | [m] |
| | | 0.7 L | 0.613 | [m] |
| | | 0.6 L | 0.567 | [m] |
| | | 0.5 L | 0.504 | [m] |
| | | 0.4 L | 0.573 | [m] |
| | | 0.3 L | 0.550 | [m] |
| | | 0.2 L | 0.544 | [m] |
| 0.1 L | 0.573 | [m] | | |
| GMmin=min(GMT) | | 0.504 | [m] | |
| Vd-V/Aw(D-d) | | 0.990 | - | |
| GMmin | | 0.504 | [m] | |
| Es Vulnerable SI GMmin<=0.05 | | No Vulnerable | | |

Tabla 23 Evaluación de Pérdida Esencial de Estabilidad (Nivel I: Llegada a Puerto)

| Condición de Carga Evaluada | | 2 | Unidades | |
|--|------------------------------------|----------------------|-------------------|-----|
| Vd-V/Aw(D-d)>=1 | Calado mínimo, d_L | 4.08 | [m] | |
| | Inercia al calado mínimo, $I(d_L)$ | 1240.91 | [m ⁴] | |
| | Calado máximo, d_H | 4.78 | [m] | |
| | Inercia al calado máximo, $I(d_H)$ | 1225.08 | [m ⁴] | |
| | ΔGMT | -0.009 | [m] | |
| Vd-V/Aw(D-d)<1 | Longitud de la Ola, λ | 42.11 | [m] | |
| | Altura de la Ola, H | 0.70 | [m] | |
| | $GM_T(\lambda, H)$ | 0.1 L | 0.556 | [m] |
| | | 0.2 L | 0.539 | [m] |
| | | 0.3 L | 0.544 | [m] |
| | | 0.4 L | 0.573 | [m] |
| | | 0.5 L | 0.602 | [m] |
| | | 0.6 L | 0.533 | [m] |
| | | 0.7 L | 0.544 | [m] |
| | | 0.8 L | 0.579 | [m] |
| 0.9 L | 0.579 | [m] | | |
| $\Delta GM_T=0.5(\max(GM_T)-\min(GM_T))$ | 0.034 | [m] | | |
| Vd-V/Aw(D-d) | | 0.990 | - | |
| ΔGMT | | 0.034 | [m] | |
| $\Delta GMT/GMT$ | | 0.060 | - | |
| R_{PR} | | 0.170 | - | |
| No es Vulnerable si $\Delta GMT/GMT \leq R_{PR}$ | | No Vulnerable | | |

Tabla 24 Evaluación de Balance Paramétrico (Nivel I: Llegada a Puerto)

| Condición de Carga Evaluada | | 2 | Unidades |
|--------------------------------------|------------|----------------------|----------|
| $lw1$ | | 0.07 | [m] |
| $lw2$ | | 0.11 | [m] |
| $\varphi0$ | | 9.0 | [°] |
| Vd-V/Aw(D-d)<1 | k | 0.7 | - |
| | $X1$ | 0.75 | - |
| | $X2$ | 0.935 | - |
| | r | 0.605 | - |
| | T | 7.883 | [s] |
| | s | 0.093 | - |
| | $\varphi1$ | 12.7 | [°] |
| $\varphi2$ | | 50.0 | [°] |
| Área a | | 0.021 | [m-rad] |
| Área b | | 0.057 | [m-rad] |
| No es Vulnerable si Área b >= Área a | | No Vulnerable | |

Tabla 25 Evaluación de Buque Apagado (Nivel I: Llegada a Puerto)

| Condición de Carga Evaluada | | 2 | Unidades |
|--|-------|-------------------|-----------------------------------|
| Coeficientes de polinomios de interpolación de resistencia al avance $Rt[N]=v^5r_5+v^4r_4+v^3r_3+v^2r_2+vr_1+r_0$ | r_5 | -6.90 | kg s ³ /m ⁴ |
| | r_4 | 165.96 | kg s ² /m ³ |
| | r_3 | -739.84 | kg s/m ² |
| | r_2 | 873.87 | kg/m |
| | r_1 | 5114.85 | kg/s |
| | r_0 | -2263.25 | N |
| Coeficientes de polinomio de interpolación de curva KT $KT=J^2k_2+Jk_1+k_0$ | k_2 | -0.1413 | - |
| | k_1 | -0.2795 | - |
| | k_0 | 0.3121 | - |
| Velocidad de Operación | | 6.2 | nudos |
| COEFICIENTE C | | 0.0050 | |
| Es Vulnerable SI C >=0.005 | | Vulnerable | |

Tabla 26 Evaluación de Navegación sobre la cresta de la Ola (Nivel II: Llegada de Puerto)

ANEXO 2

VULNERABILIDAD DEL NIVEL I DEL MODO DE FALLA DE BALANCE PARAMÉTRICO

El parámetro R_{PR} del condicional 2.11 sirve para evaluar la vulnerabilidad de Balance Paramétrico según la Segunda Generación de Criterios de Estabilidad Intacta. El método de cálculo de dicho coeficiente es el siguiente:

$R_{PR} = 1.87$, si tiene pantoque redondo; de otra manera,

$$= 0.17 + 0.425 \left(\frac{100 A_k}{LB} \right), \text{ Si } C_m \geq 0.96;$$

$$= 0.17 + (10.625 \times C_m - 9.775) \left(\frac{100 A_k}{LB} \right), \text{ Si } 0.94 < C_m < 0.96;$$

$$= 0.17 + 0.2125 \left(\frac{100 A_k}{LB} \right), \text{ Si } C_m \leq 0.94;$$

$$\left(\frac{100 A_k}{LB} \right) \text{ no debe exceder } 4$$

donde,

C_m , es el coeficiente de sección media en aguas tranquilas,

A_k , (m^2) es el área total proyectada al plano de crujía de la quilla de balance,

L , (m) eslora en flotación del buque, y,

B , (m) manga en flotación del buque.

ANEXO 3

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE ROTACIÓN PARA EL NIVEL II DE NAVEGACIÓN SOBRE LA CRESTA DE LA OLA

Para calcular la velocidad de rotación crítica del propulsor, se debe resolver la ecuación de equilibrio 3.3, que se evalúa con la celeridad de la ola (depende del número de la ola). La ecuación 3.3 se encuentra desarrollada de la siguiente manera:

$$2\pi \frac{T_e(c_i, n_{cr}) - R(c_i)}{f_{ij}} + 8a_0 n_{cr} + 8a_1 - 4\pi a_2 + \frac{64}{3} a_3 - 12\pi a_4 + \frac{1024}{15} a_5 = 0$$

donde,

$R(c_i) = r_5 c_i^5 + r_4 c_i^4 + r_3 c_i^3 + r_2 c_i^2 + r_1 c_i + r_0$, (N) Resistencia al avance en aguas tranquilas, con c_i en m/s,

$T_e(c_i, n_{cr}) = \tau_0 n_{cr}^2 + \tau_1 c_i n_{cr} + \tau_2 c_i^2$, (N) Empuje del buque,

$$a_0 = -\frac{\tau_1}{\sqrt{f_{ij} k_i (M + M_x)}},$$

$$a_1 = \frac{r_1 + 2r_2 c_i + 3r_3 c_i^2 + 4r_4 c_i^3 + 5r_5 c_i^4 - 2\tau_2 c_i}{\sqrt{f_{ij} k_i (M + M_x)}},$$

$$a_2 = \frac{r_2 + 3r_3 c_i + 6r_4 c_i^2 + 10r_5 c_i^3 - \tau_2}{k_i (M + M_x)},$$

$$a_3 = \frac{r_3 + 4r_4 c_i + 10r_5 c_i^2}{\sqrt{k_i^3 (M + M_x)^3}} \sqrt{f_{ij}},$$

$$a_4 = \frac{r_4 + 5r_5 c_i}{k_i^2 (M + M_x)^2} f_{ij},$$

$$a_5 = \frac{r_5}{\sqrt{k_i^5 (M + M_x)^5}} \sqrt{f_{ij}^3},$$

$$\tau_2 = \kappa_2 (1 - t_p) (1 - w_p)^2 \rho D_p^2,$$

$$\tau_1 = \kappa_1 (1 - t_p) (1 - w_p) \rho D_p^3,$$

$$\tau_0 = \kappa_0 (1 - t_p) \rho D_p^4,$$

$$K_T(J) = \kappa_0 + \kappa_1 J + \kappa_2 J^2,$$

$r_{0,1,2,3,4,5}$, coeficientes de interpolación de la Resistencia al avance en aguas tranquilas (aproximación polinómica de 5to orden),

$\kappa_{0,1,2}$, coeficientes de interpolación de la curva K_T (aproximación polinómica de 2do orden),

M , (kg) masa del buque,

M_x , (kg) masa añadida del buque, que puede ser asumida como $0.1 M$,

c_i , (m/s) celeridad de la ola,

k_i , (1/m) número de la ola,

f_{ij} , (N) fuerza de la ola,

T_p , coeficiente de deducción de empuje,

W_p , coeficiente de estela, y,

D_p , (m) diámetro del propulsor.