



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD DE SEGUNDA
GENERACIÓN EN BUQUES ATUNEROS: CASO DE ESTUDIO”

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

OSCAR ELIAS VITERI PERUGACHI

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a Dios por bendecirme y guiarme durante mi carrera de estudios, al Msc. Ing. Franklin J. Domínguez por su gran dedicación y ayuda para poder realizar esta investigación. A mi esposa Denisse Márquez y mi hija Ámbar Emilia que me ha dado todo su amor y apoyo en mis estudios. A mis padres Oswaldo Viteri y Otilia Perugachi por estar siempre a mi lado, apoyándome y aconsejándome, a mis hermanos mayores Rommel, Patricio, Adriana que en todo momento supieron aconsejarme y guiarme. A cada uno de los profesores de mi facultad FIMCBOR quienes han aportado sus conocimientos en mi formación integral. A la Subsecretaría de Puertos, Transporte Marítimo y Fluvial, por la oportunidad que me brindaron de trabajar y finalizar mis estudios. A mis amigos dentro y fuera de la ESPOL, grandes personas con las que he compartido mi vida estudiantil. ¡Muchas gracias!.

DEDICATORIA

La presente investigación se la dedico a Dios, por llenarme de valor y de fuerza para poder cumplir con las metas que propuestas, a mis padres Oswaldo y Otilia, a mi pequeña hija Ámbar y a mi esposa Denisse por su esfuerzo en apoyarme. Esta es la mejor forma de reconocérselos y llenarlos de orgullo. Les dedico este proyecto también a mis hermanos, familiares y amigos, por siempre estar presentes en mi vida de una forma positiva y alentadora.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
Nombre del Profesor

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente. Además, doy mi consentimiento para que ESPOI 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".

.....
Oscar Elias Viteri Perugachi

RESUMEN

En la primera parte de este trabajo se describen brevemente los modos de falla de origen dinámico que se consideran dentro los Criterios de Estabilidad Intacta de Segunda Generación los mismos que se encuentran en desarrollo por la Organización Marítima Internacional. Luego se describen matemáticamente cuatro de los modos de falla asociados a la zozobra.

Posteriormente, se presentan los buques en estudio y las condiciones de carga analizadas de cada uno. Los criterios de estabilidad mandatorios de primera generación del Código Internacional de Estabilidad sin avería (2008) son evaluados para cada embarcación, incluyendo el criterio meteorológico. Adicionalmente, el criterio de Pascual O'Dogherty, J. Ramón y Stefan Krueger son aplicados como criterios intermedios entre la primera y la segunda generación.

A continuación, la ruta de navegación ha sido seleccionada usando nodos meteorológicos para modelar las condiciones en la cuales se va aplicar SGISC. Son calculados los coeficientes de la ecuación de rolido. Una vez aplicado espectro de ola a cada nodo, la estabilidad en olas a lo largo de la embarcación es calculada con el programa Maxsurf Stability (Bentley), para obtener la variación de la curva de brazos adrizantes y altura metacéntrica por olas. Han sido evaluados en el primer y segundo nivel de vulnerabilidad los siguientes modos de falla: Rolido Paramétrico, Pérdida de Estabilidad, Surfeo - Guiñada súbita y Buque sin máquina y gobierno, para los dos buques atuneros.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
INTRODUCCIÓN	xxi
CAPÍTULO 1	26
INTRODUCCIÓN A MODOS DE FALLA POR PÉRDIDA DE ESTABILIDAD DINÁMICA.....	26
1. CONSIDERACIONES PRELIMINARES	26
1.1 Antecedentes	26
1.2 Sistema de Referencia	27
1.3 Definición de ángulos de encuentro	27
1.4 Aplicación de criterios de estabilidad de primera generación	28
1.5 Modelos matemáticos de los modos de zozobra	28
1.5.1 Resonancia paramétrica	29
1.5.2 Pérdida de estabilidad	30
1.5.3 Surfeo y guiñada súbita	31
1.5.4 Modo sin propulsión y gobierno.....	32
CAPÍTULO 2	34

2.	APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD: PRIMERA GENERACIÓN	34
2.1	Caso de estudio	34
2.1.1	Atunero I	34
2.1.2	Atunero II	36
2.2	Condición de carga.....	37
2.2.1	Atunero I - 65% Cubas, 85% Tanques	38
2.2.2	Atunero II, 65% cubas - 90% Tanques	39
2.3	Criterios de Estabilidad de Primera Generación	41
2.3.1	Criterio de J. Ramon	41
2.3.1.1	Propuesta de límites de aplicabilidad de J. Ramón	43
2.3.1.1.1	Respecto de los valores referenciales de GM.....	43
2.3.1.1.2	Respecto de la presión de viento sugerida por el autor	44
2.3.1.1.3	Respecto de valor mínimo de la curva GZ	45
2.3.2	Criterio de Pascual O'Dogherty [11]	47
2.3.2.1	Propuesta de corrección en la curva 'Ce mínimo'	49
2.3.3	Criterio Hidrodinámico relativo al cabeceo [12]	51
2.3.4	Criterio Mandatorios de estabilidad, Resolución A.749(18) [1].....	52
2.3.5	Criterio Meteorológico, Resolución A.562(14)	52
2.4	Análisis de Resultados	58
CAPÍTULO 3		60
3.	APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD: SEGUNDA GENERACIÓN – PRIMER NIVEL DE VULNERABILIDAD	60
3.1	Criterio Stefan Krueger [15] – Relativo a problemas la variación de curva GZ en olas	60
3.2	Rolido Paramétrico	65

3.2.1	Trazado de ruta.....	65
3.2.2	Espectro DNV	66
3.2.3	Masa añadida, A_{44}	67
3.2.4	Amortiguamiento no lineal de Rolido	68
3.2.5	Cálculo de estabilidad en olas longitudinales	70
3.2.6	Modos de falla del roldo paramétrico	71
3.2.7	Primer nivel de vulnerabilidad – OMI [25]	78
3.3	Perdida de Estabilidad	85
3.3.1	Primer nivel de vulnerabilidad – OMI	85
3.4	Surfeo y Guiñada Súbita	91
3.4.1	Análisis de Plano Diametral	91
3.4.2	Cálculo de escora por la guiñada súbita.....	92
3.4.3	Criterio de área residual entre la curva GZ y brazo del momento escora producido por la guiñada busca	94
3.4.4	Primer nivel de vulnerabilidad – OMI [25]	98
3.5	Buque sin propulsión y gobierno	100
3.5.1	Criterio meteorológico con modificación del MSC.1200/Circ.1200, [25], comparación.....	100
3.5.2	Portillas de desagüe	101
3.5.2.1	Tiempo para desalojar agua embarcada a través de las portillas de desagüe en función de frecuencia de ola.....	101
3.5.3	Embarque de agua en cubierta, $F_n = 0.0$	103
3.6	Análisis de Resultados	107
CAPÍTULO 4		109
4.	APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD: SEGUNDA GENERACIÓN – SEGUNDO NIVEL DE VULNERABILIDAD.....	109

4.1	Rolido Paramétrico	109
4.1.1	Segundo Nivel [25], $F_n > 0.0$	109
4.1.2	Segundo Nivel, $F_n = 0.0$	115
4.2	Perdida de Estabilidad	117
4.2.1	Segundo Nivel [25]	117
4.3	Surfeo y Guiñada Súbita	122
4.3.1	Segundo Nivel [25]	122
4.4	Buque sin propulsión y Gobierno	129
4.4.1	Segundo Nivel	129
4.4.1.1	Metodología [25]	129
4.4.1.1.1	Función de probabilidad: $W_i(HS, TZ)$	129
4.4.1.1.2	Coficiente: CS, i	131
4.4.1.2	Condiciones meteorológicas	137
4.5	Análisis de Resultados	142
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	143
	BIBLIOGRAFÍA	147
	ANEXO A	152
	ANEXO B	154
	ANEXO C	156
	ANEXO D	163
	ANEXO E	164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Características principales de Atunero I en la condición de máxima carga.	35
Tabla II. Características principales de Atunero II.....	37
Tabla III. Desagregación de pesos en Maxsurf Módulo de Estabilidad, Atunero I – Parte 1/2.....	38
Tabla IV. Desagregación de pesos en Maxsurf Módulo de Estabilidad, Atunero I – Parte 2/2.....	39
Tabla V. Desagregación de pesos en Maxsurf Módulo de Estabilidad, Atunero II – Parte 1/2.....	39
Tabla VI. Desagregación de pesos en Maxsurf Módulo de Estabilidad, Atunero II – Parte 2/2.....	40
Tabla VII Tabla comparativa del criterio de Pascual O'Dogherty.....	42
Tabla VIII. Tabla comparativa del criterio de O'Dogherty.....	49
Tabla IX. Tabla comparativa del criterio Ce mínimo modificado y aplicado en ambos buques atuneros.....	50
Tabla X. Datos de entrada para el gráfico de severidad de cabeceo.....	51
Tabla XI. Datos de entrada para la aplicación del criterio Meteorológico.	54
Tabla XII. Resultados de los criterios mandatorios de la OMI, aplicados con ola 'flat'.	57
Tabla XIII. Datos de entrada para el análisis del criterio de Stefan Krueger, remarcado en color azul sugerencia del autor del proyecto.....	61
Tabla XIV. Resultados del Criterio de Krueger, Atunero I.....	62
Tabla XV. Resultados del Criterio de Krueger, Atunero II.....	63
Tabla XVI. Datos meteorológicos del trayecto de ida.....	66
Tabla XVII. Datos meteorológicos del trayecto de regreso.	66
Tabla XVIII. Resumen de resultados de integración de espectro de ola efectuado en cada nodo.....	67
Tabla XIX. Resultados de Inercia añadida de los buques en estudio, integrada a lo largo del casco.	67

Tabla XX. Coeficiente de amortiguamiento calculado para cada nodo, en [(Ton*m ²)/seg] con Fn>0.....	69
Tabla XXI. Coeficiente de amortiguamiento calculado para cada nodo, en [(Ton*m ²)/seg] con Fn=0.....	70
Tabla XXII. Resultado de Criterio de coincidencias de Periodos de Rolido, Atunero I.	73
Tabla XXIII. Resultado de Criterio de coincidencias de Periodos de Rolido, Atunero II.	74
Tabla XXIV. Desagregación del cálculo de los parámetros p y q para el nodo 4, $\mu = 0.084$, en color azul un punto dentro del rango inestable, Atunero I	75
Tabla XXV. Resultados del segundo criterio de Rolido Paramétrico para la altura significativa de cada nodo, Atunero I.	76
Tabla XXVI. Resultados del segundo criterio de Rolido Paramétrico para la altura significativa de cada nodo, Atunero II.	76
Tabla XXVII. Resultados de criterio Dunwoody, Atunero I.....	77
Tabla XXVIII. Resultados de criterio Dunwoody, Atunero II.....	78
Tabla XXIX. Criterios de frecuencia, Nivel I modo de falla Rolido Paramétrico, Atunero I.	80
Tabla XXX. Criterios de frecuencia, Nivel I modo de falla Rolido Paramétrico, Atunero II.	81
Tabla XXXI. Criterios de magnitud de variación de GM, Nivel I modo de falla Rolido Paramétrico, Atunero I.	82
Tabla XXXII. Criterios de magnitud de variación de GM, Nivel I modo de falla Rolido Paramétrico, Atunero II.	84
Tabla XXXIII. Cálculo del criterio Cr1, para evaluar el primer nivel de vulnerabilidad de pérdida de estabilidad, con velocidad de servicio 10.50, Atunero I, Lpp=38.48 [m].	88
Tabla XXXIV. Cálculo del criterio Cr1, para evaluar el primer nivel de vulnerabilidad del modo de falla: pérdida de estabilidad, con velocidad de servicio 11.05, Atunero I, Lpp=38.48 [m].	90
Tabla XXXV. Cálculo del criterio Cr1, para evaluar el primer nivel de vulnerabilidad de pérdida de estabilidad, Atunero II, Lpp=42.73 [m].....	90

Tabla XXXVI. Resultado del criterio de estabilidad del plano diametral.....	91
Tabla XXXVII. Cálculo de la estimación de escora en guiñada súbita después de la condición de surfeo, Atunero I.....	93
Tabla XXXVIII. Cálculo de la estimación de escora en guiñada súbita después de la condición de surfeo, Atunero II.....	94
Tabla XXXIX. Criterio de área requerida entre las curvas de GZ y brazo debido a la guiñada brusca, Atunero I.	96
Tabla XL Criterio de área requerida entre las curvas de GZ y brazo debido a la guiñada brusca, Atunero II.	97
Tabla XLI. Primer nivel de vulnerabilidad del modo de falla de surfeo, $L_{pp} = 38.48$ [m], Atunero I.....	99
Tabla XLII. Primer nivel de vulnerabilidad del modo de falla de surfeo, $L_{pp} = 42.73$ [m], Atunero II.....	99
Tabla XLIII. Cuadro comparativo: tabla de paso de ola en el criterio meteorológico, por MSC.1/Circ.1200. En la izquierda valores correspondientes al anterior criterio meteorológico.....	100
Tabla XLIV. Resultado de las áreas mínimas de las portillas de desagüe para ambos atuneros.	101
Tabla XLV. Datos de entrada para el ingreso al cálculo de tiempo para desalojar agua de cubierta por las portillas de desagüe de ambos buques atuneros.	102
Tabla XLVI. Calculo de Momento de escora producido por el embarque de agua en cubierta, Atunero I.....	105
Tabla XLVII. Calculo de Momento de escora producido por el embarque de agua en cubierta Atunero II.	106
Tabla XLVIII. Función de probabilidad, W_i , respecto de la altura de ola.	110
Tabla XLIX. Criterio de rango de velocidad, modo de falla rolo paramétrico, Atunero I.	112
Tabla L. Criterio de rango de velocidad, modo de falla de rolo paramétrico, Atunero II.	113
Tabla LI. Criterio de rolo de respuesta en el nivel de vulnerabilidad II del modo de falla rolo paramétrico, ambos atuneros.	115

Tabla LII. Criterio de respuesta en segundo nivel de vulnerabilidad del modo de falla roldo paramétrico, en ambos buques atuneros	116
Tabla LIII. Resumen de Resultados del segundo criterio de vulnerabilidad del modo de falla: Perdida de Estabilidad, CR3, Atunero I.	120
Tabla LIV. Resumen de Resultados del segundo criterio de vulnerabilidad del modo de falla: Perdida de Estabilidad, CR3, Atunero II.	121
Tabla LV. Resultados de los coeficientes de las curvas de resistencia de ambas embarcaciones.	125
Tabla LVI. Resultados de la estimación de los coeficientes propulsivos.	126
Tabla LVII. Resultados de los coeficientes de las curvas de coeficiente de empuje.	127
Tabla LVIII. Criterio Melnikov, Nivel II modo de falla surfeo, Atunero I, velocidad de servicio en [m/seg] = 5.39.	128
Tabla LIX. Criterio Melnikov, Nivel II modo de falla surfeo, Atunero II, velocidad de servicio en [m/seg] = 5.65.	128
Tabla LX. Resumen de los valores de probabilidad de dispersión W_i en cada nodo, resultados tanto como para el Atunero I y Atunero II.	131
Tabla LXI. Cálculo de momento escora debido al viento y comparación con el máximo valor de la curva GZ, Atunero I.	133
Tabla LXII. Cálculo de momento escora debido al viento y comparación con el máximo valor de la curva GZ, Atunero II.	133
Tabla LXIII. Calculo los parámetros necesarios para el obtener la longitud de onda dentro del área de compensación, Atunero I.	137
Tabla LXIV. Calculo los parámetros necesarios para el obtener la longitud de onda dentro del área de compensación, Atunero II.	137
Tabla LXV. Desglose de cálculo del coeficiente $CS_{,i}$ en cada uno de los nodos, Atunero I.	140
Tabla LXVI. Desglose de cálculo del coeficiente $CS_{,i}$ en cada uno de los nodos, Atunero II.	140
Tabla LXVII. Resultados segundo criterio de vulnerabilidad del buque Atunero I.	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1 Clasificación de tipos conocidos de inestabilidad, dependiente del ángulo de encuentro de buque y la ola. Fuente: [5]	26
Figura No. 2 Sistema de referencia de los 6 grados de libertad. Fuente: [6]	27
Figura No. 3 Clasificación de ángulo de encuentro de buque y ola. Fuente: [6]	28
Figura No. 4 Propuesta del proceso de evaluación con SGISC. Fuente [7]	29
Figura No. 5 Variación del plano de flotación del Atunero II, en función de posición de ola, en azul quebranto, rojo arrufo. Altura de ola 2.2 [m], y longitud = 42.73[m]. Fuente: Rhinoceros – versión de prueba.	31
Figura No. 6 Fuerzas longitudinales que actúan en la navegación con olas de popa Fuente [5]:	32
Figura No. 7 Escenario donde se presenta la condición sin propulsión y gobierno. Fuente: [4]	32
Figura No. 8 Vista en 3D del Atunero I. Fuente: Rhinoceros – Versión de prueba. ...	35
Figura No. 9 Curva de áreas Atunero I. Fuente: Maxsurf 20, Modulo: Modeler, versión de prueba.	36
Figura No. 10 Vista en 3D del Atunero II. Fuente: Rhinoceros – Versión de prueba.	36
Figura No. 11 Curva de áreas Atunero II. Fuente: Maxsurf 20, Modulo: Modeler, versión de prueba.....	37
Figura No. 12 Regresión de GM en la condición de salida de puerto. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.....	43
Figura No. 13 Regresión de GM en la condición de llegada a de puerto. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	44
Figura No. 14 Comparación de la presión de viento sugiera por J. Ramón y la presión del criterio meteorológico. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.....	45
Figura No. 15 Comparación de GZ mínimo por J. Ramón y GZ mínimo a 30° o más del código IS. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	46
Figura No. 16 Coeficiente Ce mínimo propuesto por O'Dogherty. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.....	48

Figura No. 17 Curva Ce corregida, incluyendo todos los puntos de buques siniestrados. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.....	49
Figura No. 18 Resultados de ambos atuneros I y II dentro de la gráfica de severidad de cabeceo en el diseño hidrodinámico preliminar. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	51
Figura No. 19 Cálculo de áreas a y b en criterios meteorológico. Fuente: [14].....	53
Figura No. 20 Cálculo del centroide y área velica, Atunero I	54
Figura No. 21 Cálculo del centroide y área velica, Atunero II.	54
Figura No. 22 Curva de brazos adrizantes, Atunero I, condición de máxima carga. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.	55
Figura No. 23 Curva de estabilidad dinámica a máxima carga, Atunero I. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.	56
Figura No. 24 Curva de brazos adrizantes, Atunero II, condición a máxima carga. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.	56
Figura No. 25 Curva de estabilidad dinámica a máxima carga, Atunero II. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.	57
Figura No. 26 Variación de curva GZ, Atunero I, longitud de ola 38.48 [m] y altura de ola 3.42 [m]. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	62
Figura No. 27 Variación de curva GZ, Atunero II, longitud de ola 42.73 [m] y altura de ola 3.97 [m]. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	63
Figura No. 28 Esquema de los nodos seleccionados para el caso de estudio, Fuente: Google Earth Pro.....	65
Figura No. 29. Curva de Inercia añadida del Atunero I, a lo largo de la eslora. Fuente: Matlab 15 versión de prueba.	68
Figura No. 30. Variación de GM con ola del nodo 5, respecto de la longitud de ola, Atunero I. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	70
Figura No. 31. Diagrama Ince-Strutt-amortiguado con los resultados en el nodo 4. Atunero I.....	75
Figura No. 32. Ejemplo de cálculo de la distancia x_1 y x_2 de la curva de variación de GM, en el primer nivel de vulnerabilidad de pérdida de estabilidad, Atunero I. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	86
Figura No. 33. Cálculo del plano diametral del Atunero I.	91

Figura No. 34. Cálculo del plano diametral del Atunero II.....	91
Figura No. 35 Ejemplo de intersección entre la curva de brazos adrizantes y momento producido, $H_w = 4.01$ [m], nodo 5, Atunero I. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.	93
Figura No. 36 Área residual entre las curvas GZ y brazo debido a la guiñada brusca, de 0° a 40° , ejemplo de cálculo del área 1 [28].	95
Figura No. 37 Área de la curva GZ de 0° hasta 40° de escora, ejemplo de cálculo del área 2, [28].	95
Figura No. 38 Gráfica de la curva GZ y momento debido a la guiñada brusca, nodo 3, Atunero I.....	97
Figura No. 39 Gráfica de la curva GZ y momento debido a la guiñada brusca, nodo 9, Atunero II.....	98
Figura No. 40. Representación de efecto de agua en cubierta, [3].....	104
Figura No. 41. Coeficiente experimental κ . Fuente: Minitab 18, versión de prueba. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.....	105
Figura No. 42. Función de ponderación respecto de altura de ola. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.....	110
Figura No. 43. Identificación de parámetros en la curva GZ. Fuente: [10].....	117
Figura No. 44 Curvas GZ correspondientes a los GM olas detectados en el criterio de Perdida de Estabilidad, primer nivel de vulnerabilidad ($GM < 0.15$ [m]), Atunero I. .	119
Figura No. 45 Curvas GZ correspondientes a los GM olas detectados en el criterio de Perdida de Estabilidad, primer nivel de vulnerabilidad ($GM < 0.15$ [m]), Atunero II. .	121
Figura No. 46 Simulación de estela formado por el Atunero I. Fuente: Maxsurf Resistance.....	123
Figura No. 47 Resultados obtenidos con la aproximación de Holtrop Atunero I. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	124
Figura No. 48 Simulación de estela formado por el Atunero II. Fuente: Maxsurf Resistance.....	124
Figura No. 49 Resultados obtenidos con la aproximación de Holtrop Atunero II. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	125
Figura No. 50 Coeficiente propulsivo, K_t del Atunero I. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	126

Figura No. 51 Coeficiente propulsivo, K_t del Atunero II. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	127
Figura No. 52. Diagrama de superficie de la probabilidad de ocurrencia W_i . Fuente: Minitab 18, versión de prueba.	130
Figura No. 53 Representación gráfica de los principales ángulos en el segundo nivel de vulnerabilidad utilizando el proceso de área equivalente. Fuente: [25].....	135
Figura No. 54 Curva de brazos adrizantes a máxima carga del Atunero I, graficada en todo el rango de estabilidad tanto como en sentido positivo y su equivalente negativo, nodo 4, Atunero I. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.....	135

Símbolos alfabéticos		
B	[m]	Manga del buque
c	[m/seg]	Celeridad de la ola
D_p	[m]	Diámetro de la hélice
F_n	[]	Número de froude= $\left(\frac{V_s}{\sqrt{L \cdot g}}\right)$
g	[m/seg ²]	Gravedad
GM	[m]	Altura metacéntrica
J	[]	Coefficiente de propulsión
H_s	[m]	Altura significativa
H_w	[m]	Altura de ola
$K_T(J)$	[]	Coefficiente de empuje de la hélice
L	[m]	Eslora
L_{PP}	[m]	Eslora entre perpendiculares
m	[ton]	Masa
T	[m]	Calado
T_w	[seg]	Período de la ola
T_e	[seg]	Período de encuentro de la ola y el buque
T_ϕ	[seg]	Período de rolido natural del buque
V_s	[m/seg]	Velocidad de servicio del buque
ω_e	[rad/seg]	Frecuencia de encuentro de buque y la ola
ω_w	[rad/seg]	Frecuencia de la ola
Símbolos Griegos		
α, β		Componentes del espectro de DNV
A_ϕ		Momento de masa inercial en rolido
B_ϕ		Amortiguamiento de la ecuación de rolido
C_ϕ		Componente de restauración de la ecuación de rolido
ζ_a	[m]	Amplitud de ola
ϕ	[deg]	Amplitud de rolido
λ	[m]	Longitud de la ola

ρ	[ton/m ³]	Densidad del agua
ξ_G	[m]	Posición longitudinal del buque respecto de la ola
Δ	[ton]	Desplazamiento
Abreviaturas		
SGISC	Criterios de Estabilidad Intacta de Segunda Generación	
OMI	Organización Marítima Internacional	
LCG	Centro de gravedad longitudinal	

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los casos de zozobra en navegación de buques pesqueros de bandera ecuatoriana han incrementado, a pesar de que conociendo que es un requisito para el permiso de tráfico el tener un libreto de estabilidad aprobado bajo los criterios de la OMI [1], [2]. Puede suponerse entonces, que los criterios actuales no son suficientes para determinar si una embarcación es completamente segura para la navegación. Esta hipótesis no es nueva, las primeras versiones del criterio meteorológico fueron desarrolladas en la década de 1950, con el fin de tener en consideración los efectos de vientos severos en el rolido de un buque sin propulsión ni gobierno [3]. Pauling (1961) describió la estabilidad transversal de un buque en olas longitudinales. Chantrel (1984) presentó las variaciones de la amplitud de rolido, fenómeno atribuido a la resonancia paramétrica, así como una amplia y variada lista de publicaciones que llevaron a que la Organización Marítima Internacional realice frecuentemente encuentros sobre los avances en el desarrollo de los criterios de estabilidad de segunda generación, SGISC, por sus siglas en inglés. Se han identificado cinco modos de falla claramente: Rolido Paramétrico, Pérdida de Estabilidad, Surfeo y Guiñada súbita, Condición de Buque sin Máquina y Gobierno y Aceleraciones Excesivas.

Cada uno de los modos de falla tiene tres niveles de control y se requiere que un buque cumpla con uno de estos tres niveles para satisfaga los SGISC. Esta investigación se propone revisar los criterios aplicables a los modos de falla que permitan evaluar la siniestralidad de un proyecto en la etapa de diseño. De esta manera evitar análisis excesivos y costosos con buques que no son vulnerables al modo de fallo en cuestión. Los criterios de nivel inferior requieren menos esfuerzos computacionales, pero en cambio también proporcionan un nivel de seguridad más conservador.

Para los dos primeros niveles de vulnerabilidad, de los modos de falla: rolido paramétrico y pérdida de estabilidad y surfeo - guiñada súbita, los criterios propuestos por la OMI están prácticamente finalizados, excepto por algunos temas en evaluación.

Mientras que para los criterios de la condición del buque sin propulsión y aceleraciones excesivas el primer nivel de vulnerabilidad se encuentra casi finalizado, y existen esfuerzos bastante profundos en el segundo nivel de cada uno.

El rolido paramétrico es un modo de falla de dependencia temporal con variaciones periódicas del brazo adrizante caracterizado por una disminución de la estabilidad cuando la ola se encuentra en quebranto y un aumento virtual de la estabilidad en arrufo. Normalmente, ocurre el caso más peligroso cuando la frecuencia de encuentro de olas es aproximadamente el doble de la frecuencia para rolido.

La pérdida de estabilidad es un modo de falla relacionado a la reducción de la curva GZ en un tiempo prolongado. Esta situación puede ocurrir cuando una embarcación se encuentra con una ola de popa con gran longitud y con celeridad cercana a la velocidad de la nave. La dinámica de este fenómeno es distinta al rolido paramétrico, pero están estrechamente ligadas en magnitud y cambio del área del plano de agua. Además, mientras que el rolido paramétrico requiere múltiples olas para que el modo de falla se desarrolle, la pérdida de la estabilidad puede ser producida por una sola ola.

La guiñada súbita es un giro descontrolado que a menudo va acompañado de un gran ángulo de escora y puede conducir a una inestabilidad parcial o la zozobra. El fenómeno está precedido por el surfeo donde el buque es acelerado por una ola de popa, la ola captura el barco y lo acelera de tal manera que el barco comienza a moverse con la velocidad correspondiente a la celeridad de la onda. Se le conoce como un problema que afecta principalmente a buques pesqueros, barcos rápidos monocascos, y buques militares [4].

La condición de Buque sin Máquina y Gobierno es un modo de falla que supone el escenario donde una nave ha perdido su propulsión y es sometido frecuentemente a olas de costado, acción del viento y sus efectos combinados. El resultado de la acción de un par de fuerzas que producen los fenómeno son: el viento, la fuerza aerodinámica y la reacción hidrodinámica causada por el movimiento transversal del barco. El ingreso de agua en cubierta se puede presentarse en buques con poco

francobordo y donde la respuesta natural de rolo del buque se ve considerablemente disminuida.

El último modo de falla: Aceleraciones excesivas, donde los criterios para este modo de falla se encuentran en desarrollo por la OMI y en cual se consideran barcos con excesiva altura metacéntrica y con superestructuras que generan gran área vélica, hasta este punto en las investigaciones realizadas, el modo de falla puede eventualmente no puede ser la causa directa a la zozobra, pero con riesgo de ángulos de escora elevados y posible ingreso de agua por rompientes de ola, igual de riesgosos en buques de trabajo o de pasajeros, sea el caso.

OBJETIVO GENERAL

Analizar los criterios que puedan identificar el posible riesgo de zozobra (“capsizing”) de dos buques atuneros con características similares, aplicando criterios de estabilidad de primera y segunda generación (SGISC) en el primer y segundo nivel de vulnerabilidad.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos que se desean conseguir son:

- Asociar el estado del arte actual con la propuesta del caso de estudio en buques atuneros de la flota ecuatoriana.
- Realizar la descripción matemática de los modos de falla por medio de problemas de estabilidad dinámica.
- Identificar los factores críticos que afectan los modelos matemáticos propuestos en los Criterios de Estabilidad de Segunda Generación.

BENEFICIOS

Se espera desarrollar la aplicabilidad de Criterios de Estabilidad de Segunda Generación - SGISC en buques atuneros de la flota ecuatoriana, que motive a la investigación más profunda de cada uno de los fenómenos presentados en este proyecto.

HIPÓTESIS

La zozobra de los buques en la flota atunera en mar abierto puede ser causada por uno o varios modos de falla asociados con los criterios de estabilidad de segunda generación.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A MODOS DE FALLA POR PÉRDIDA DE ESTABILIDAD DINÁMICA

1. CONSIDERACIONES PRELIMINARES

En esta sección, se presentan las consideraciones preliminares relacionadas a los fenómenos asociados con la zozobra y claramente identificados por la OMI, con la finalidad de determinar el modelo matemático a ser aplicado en cada caso.

1.1 Antecedentes

Actualmente se conoce que existen varios fenómenos dinámicos como posibles causas de zozobra de buques. Los fenómenos son clasificados por el tipo de ola en el que pueden presentarse como se muestra en la Figura No. 1, sin embargo, es necesario indicar que los fenómenos también pueden ocurrir con olas en dirección diagonal a la del buque ('quartering seas').

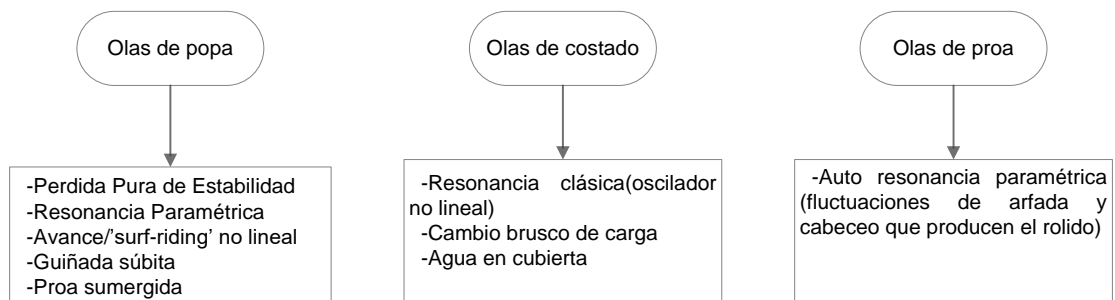


Figura No. 1 Clasificación de tipos conocidos de inestabilidad, dependiente del ángulo de encuentro de buque y la ola. Fuente: [5]

1.2 Sistema de Referencia

Los criterios de estabilidad dinámica se aplican escogiendo un sistema de referencia para todos los cálculos, incluyendo los 6 grados de libertad que posee la embarcación. El sistema seleccionado se muestra en la Figura No. 2.

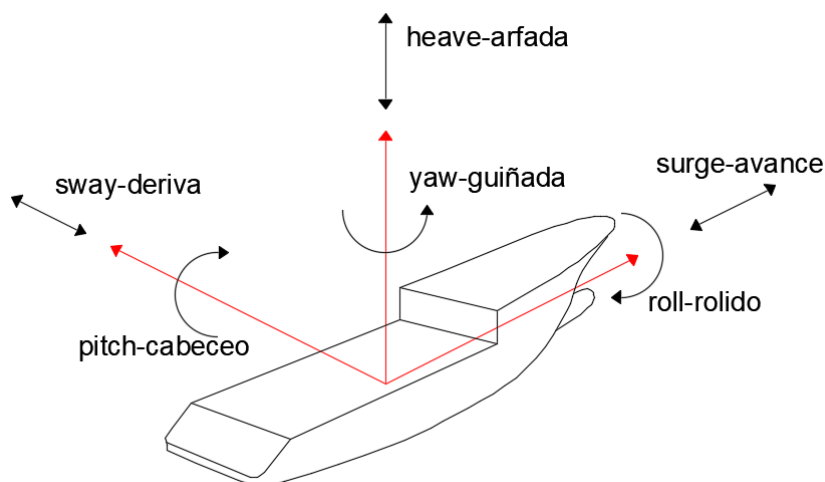


Figura No. 2 Sistema de referencia de los 6 grados de libertad. Fuente: [6]

Los fenómenos asociados a la zozobra pueden ser analizados incorporando los 6 grados de libertad, pero para el desarrollo matemático y su aplicabilidad, los criterios dan mayor importancia a uno, dos y hasta tres grados de libertad, según sea el caso. En este proyecto el movimiento de rolido es utilizado en los 4 criterios analizados, siendo el parámetro determinante si el buque zozobra o no.

1.3 Definición de ángulos de encuentro

Los modelos matemáticos de zozobra responden a las ecuaciones de movimiento del buque y de las olas, de ahí la importancia de definir el ángulo de encuentro entre la ola y el buque. En la Figura No. 3 se muestra el sistema de referencia de los ángulos mencionados.

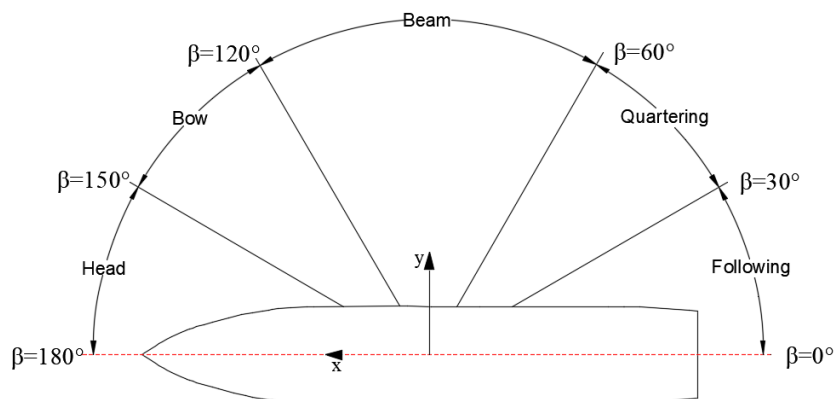


Figura No. 3 Clasificación de ángulo de encuentro de buque y ola. Fuente: [6]

1.4 Aplicación de criterios de estabilidad de primera generación

La resolución A.562(14) de 1985 y el Código IS 2008 [1] fueron creados con el objetivo de incorporar los criterios mandatorios para las embarcaciones. La Parte A del código se divide en 2 grandes criterios, el relacionado con las propiedades de la curva de brazos adrizantes (curva GZ) y el criterio meteorológico. Ambos criterios mandatorios para todas las condiciones de carga, debiendo incluirse la superficie libre en los casos correspondientes. La Organización Marítima Internacional – OMI reconoció en 2002 las limitaciones del criterio para cierto tipo de naves y la no incorporación de los modos de falla en olas. El mismo año la OMI designó un comité para trabajar en el desarrollo de nuevos requerimientos de estabilidad.

1.5 Modelos matemáticos de los modos de zozobra

El desarrollo de los nuevos criterios tiene como propósito mejorar las regulaciones actuales, aumentar la seguridad de futuras embarcaciones y prevenir accidentes en las embarcaciones operativas. Los criterios se basan principalmente en medir el nivel de vulnerabilidad de los buques en caso de sufrir problemas de estabilidad a causa de fenómenos dinámicos.

Los niveles de vulnerabilidad son la herramienta que se incorporará dentro del diseño de buque como se muestran en la Figura No. 4.

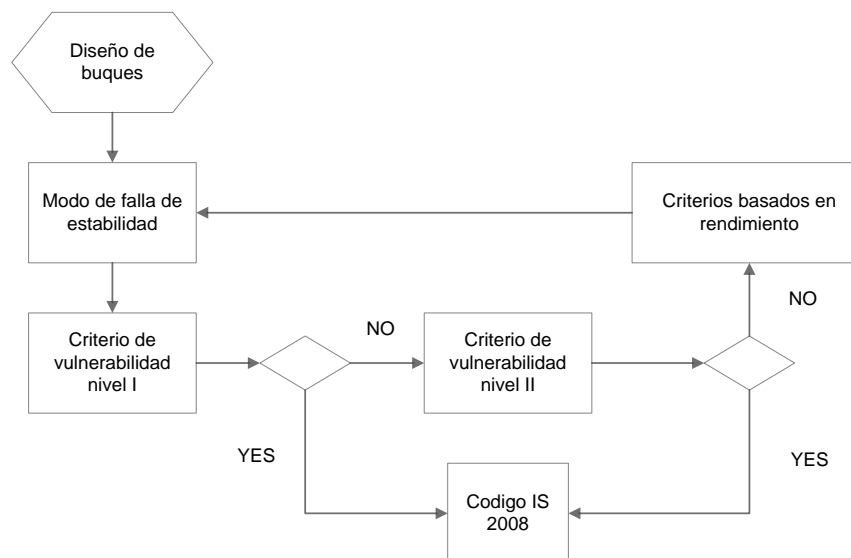


Figura No. 4 Propuesta del proceso de evaluación con SGISC. Fuente [7]

De acuerdo con los estudios realizados hasta el momento, eventualmente la Figura No. 4 incorporará un tercer y cuarto nivel de vulnerabilidad, cuando se presente el caso.

1.5.1 Resonancia paramétrica

El modo Balance Paramétrico es un fenómeno generado por una serie de olas en una determinada frecuencia que genera la amplificación gradual de la amplitud de rolo debido a la pérdida de amortiguamiento, Dunwoody [8] [9].

El fenómeno se analiza mediante una ecuación diferencial ordinaria homogénea de segundo orden, ecuación (1.1), con coeficientes variables en el tiempo, que representa el equilibrio cuasi-estático, por efecto de olas de proa o popa. Dichos coeficientes son: A_φ , la inercia del buque combinado con la inercia añadida, $B_{\varphi e}$, el amortiguamiento de rolo equivalente considerado como una combinación lineal y no lineal, la variación en el tiempo del brazo adrizante GZ, C_φ y el momento excitador $M_\varphi(\omega t)$:

$$A_\varphi \ddot{\varphi} + B_{\varphi e} \dot{\varphi} + C_\varphi \varphi = M_\varphi(\omega t) \quad (1.1)$$

Considerando un buque navegando en olas longitudinales, sea de popa o de proa, el momento excitador puede ser tomado como despreciable para el análisis.

La ecuación general de rolido al momento de realizar las sustituciones en los coeficientes de la ecuación (1.1) [4], puede ser expresada como la que se presenta en la ecuación (1.2):

$$\ddot{\varphi} + 2\delta\dot{\varphi} + (\overline{\omega}_m^2 + \overline{\omega}_a^2 \cos(\omega_e t))\varphi = 0 \quad (1.2)$$

Usando la transformada $\varphi(\tau) = x(\tau) * \exp(-\mu\tau)$, se puede obtener la forma general de Mathieu, ecuación que permitirá posteriormente la evaluación del riesgo al rolido paramétrico.

1.5.2 Pérdida de estabilidad

La Pérdida de estabilidad, es un modo cuasi estático que ocurre cuando el buque navega con olas de popa y sufre una reducción notable en la capacidad de adrizamiento debido a la disminución del área del plano de flotación [10]. Esta condición de estabilidad reducida es peligrosa, porque el modo de falla puede ser producido por una sola ola de popa en diagonal, de modo que, si el buque se encuentra navegando a una velocidad cercana a la celeridad de la ola, a ésta le tomará un tiempo relativamente alto en pasar a través de la embarcación, lo que implica que la condición de estabilidad reducida sea constante durante un largo periodo de tiempo. Aumentando la probabilidad de que se desarrolle un gran ángulo de escora o incluso la zozobra [10].

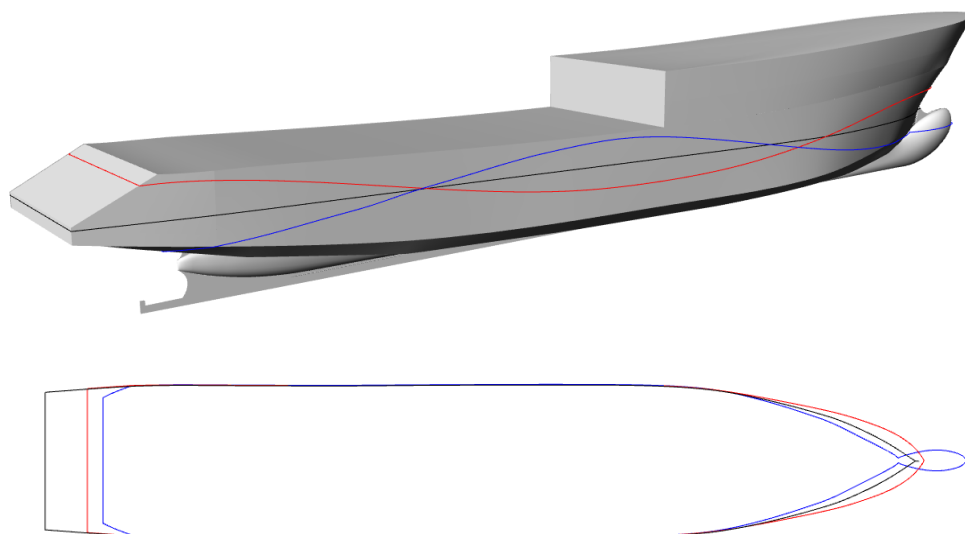


Figura No. 5 Variación del plano de flotación del Atunero II, en función de posición de ola, en azul quebranto, rojo arrufo. Altura de ola 2.2 [m], y longitud = 42.73[m].
Fuente: Rhinoceros – versión de prueba.

El proceso para evaluar el primer y segundo nivel de vulnerabilidad consiste en calcular el tiempo que le toma a la embarcación salir de la zona donde la curva de variación de GM está por debajo del valor crítico.

1.5.3 Surfeo y guiñada súbita

Cuando un buque navega en olas longitudinales, tres fuerzas actúan en la dirección axial: empuje, resistencia y fuerza de avance de la ola. Para que el fenómeno de surfeo ocurra, la longitud de ola debe encontrarse en el rango de 0.75 a 2.0 veces la eslora entre perpendiculares del buque y la velocidad de la embarcación debe estar cerca del 75% respecto de la celeridad de la ola. Además es importante identificar la posición de la cresta a largo del buque, debido a la disminución del brazo adrizante en la condición de surfeo y la reducción del radio de giro en la maniobrabilidad [4].

La siguiente ecuación puede ser considerada como el modelo matemático ideal para representar la condición de equilibrio en el surfeo [4]:

$$(m + m_x) * \ddot{\xi}_G + R(c + \dot{\xi}_G) - T(c + \xi_G, n) + F_W(\xi_G) = 0 \quad (1.3)$$

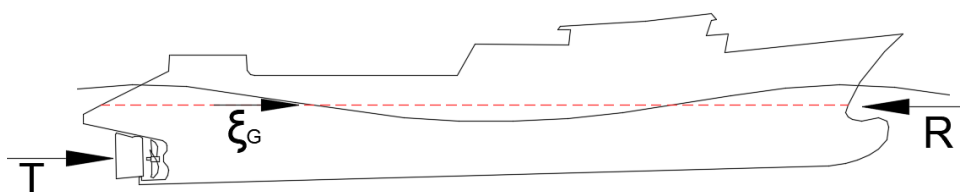


Figura No. 6 Fuerzas longitudinales que actúan en la navegación con olas de popa
Fuente [5]:.

1.5.4 Modo sin propulsión y gobierno

El fenómeno puede ocurrir cuando el buque se queda sin propulsión y gobierno. La acción de las olas hace que el buque se posicione con la proa en dirección perpendicular a las olas incidentes u olas de costado. En esta situación el buque puede zozobrar debido a la combinación del elevado momento escorante causado por las olas, fuertes vientos, embarque de agua en cubierta.

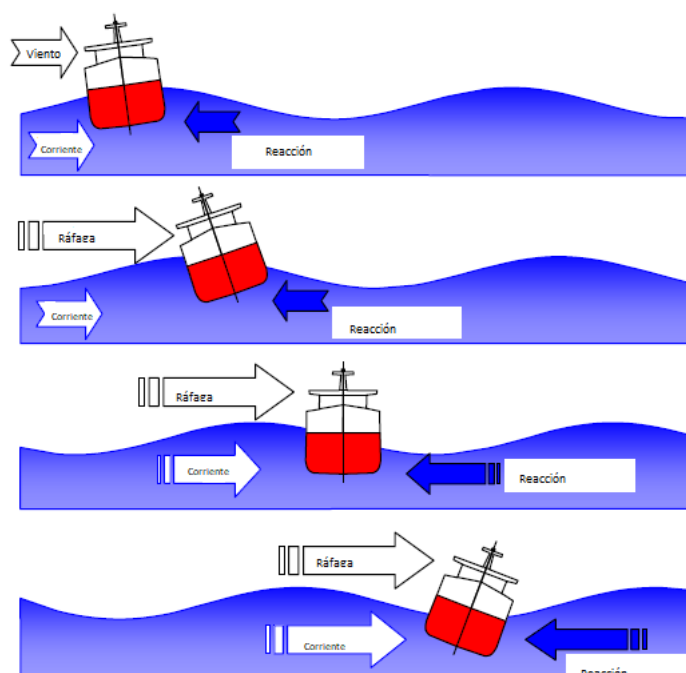


Figura No. 7 Escenario donde se presenta la condición sin propulsión y gobierno.
Fuente: [4]

Se considera un modelo matemático que describe la ecuación de rolo, con un componente por acción de olas y otro por acción de viento. El MSC.1/Circ. 1200 sugiere usar el criterio meteorológico con un cambio en la tabla de variación de paso de ola, para poder evaluar el nivel uno de vulnerabilidad de este fenómeno.

El segundo nivel de vulnerabilidad fundamentalmente relaciona una serie de asunciones donde el viento y las olas actúan en la misma dirección. El estado del viento se caracteriza por una velocidad media del viento y un espectro de ráfaga. El estado de mar se caracteriza por un espectro de elevación de onda y se asume que las olas son de gran longitud de cresta.

CAPÍTULO 2

2. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD: PRIMERA GENERACIÓN

En este capítulo se presentan las características principales de los dos buques seleccionados. Se exponen las condiciones de cargas para los casos de estudio. A seguir, se realizan los cálculos de Estabilidad Intacta sin Avería (criterios de primera generación de OMI) por medio del software Maxsurf, como complemento se analiza el criterio de O'Dogherty, J Ramón y la severidad de la posibilidad del cabeceo relacionado al diseño hidrodinámico de las embarcaciones. Finalmente, se ha realizado un análisis comparativo de todos los criterios mencionados.

2.1 Caso de estudio

Se han seleccionado dos buques atuneros con características y dimensiones similares. Los barcos de estudio presentan formas de proa en V, con doble china, espejo y bulbo de proa y popa.

2.1.1 Atunero I

Las características principales del Atunero I son presentadas en la Tabla I. En la Figura No. 8 se presenta la maqueta del buque, la cual fue utilizada para los diferentes cálculos realizados durante la investigación, y su respectiva curva de áreas en la Figura No. 9.

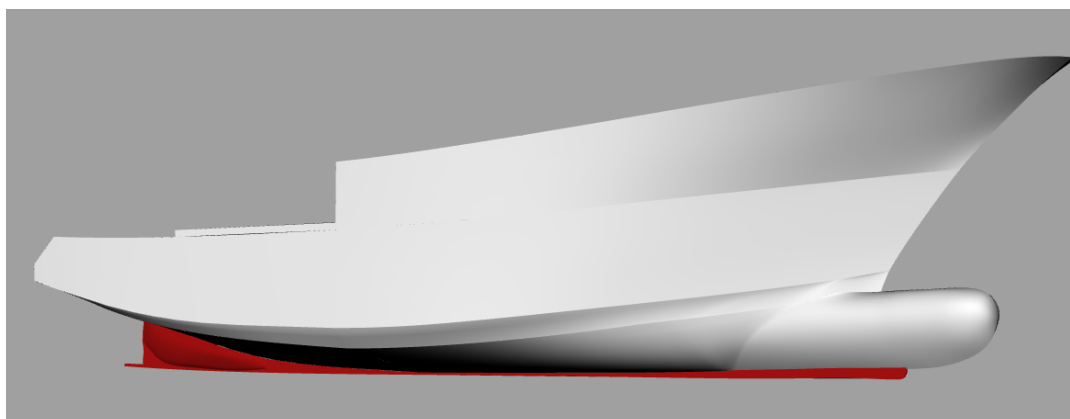


Figura No. 8 Vista en 3D del Atunero I. Fuente: Rhinoceros – Versión de prueba.

Eslora	[m]	45.10
Eslora entre PP	[m]	38.48
Eslora de flotación	[m]	40.37
Manga	[m]	7.92
Puntal	[m]	4.75
Asiento (+ a popa)	[m]	0.17
Calado	[m]	4.18
Desplazamiento	[ton]	803.30
Área de plano de agua	[m ²]	263.16
Coefficiente bloque	[]	0.56
Coefficiente de plano de agua	[]	0.82
LCB (+ a proa)	[m]	-2.07
LCF (+ a proa)	[m]	-3.51
Centro de gravedad	[m]	3.54
Altura metacéntrica transversal	[m]	0.544
Altura metacéntrica longitudinal	[m]	35.17
Velocidad del buque	[nudos]	10.50
Periodo natural de rolo	[seg]	8.36

Tabla I. Características principales de Atunero I en la condición de máxima carga.

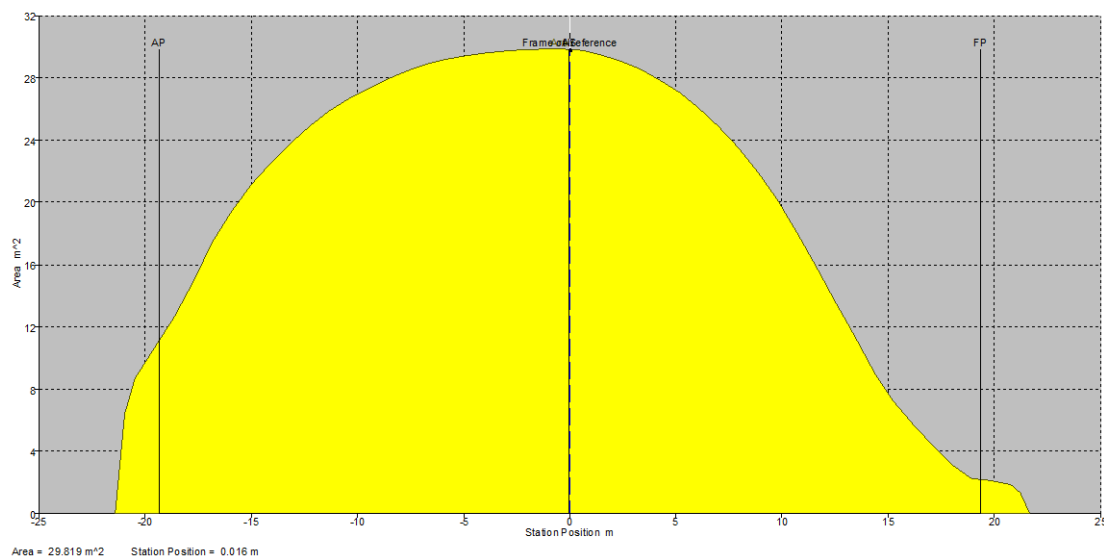


Figura No. 9 Curva de áreas Atunero I. Fuente: Maxsurf 20, Modulo: Modeler, versión de prueba.

2.1.2 Atunero II

A continuación, se presentan las características principales del buque Atunero II, que al igual que en el Atunero I, presenta una segunda cubierta desde sección media hacia proa, dando como resultado una reserva de flotabilidad en proa.

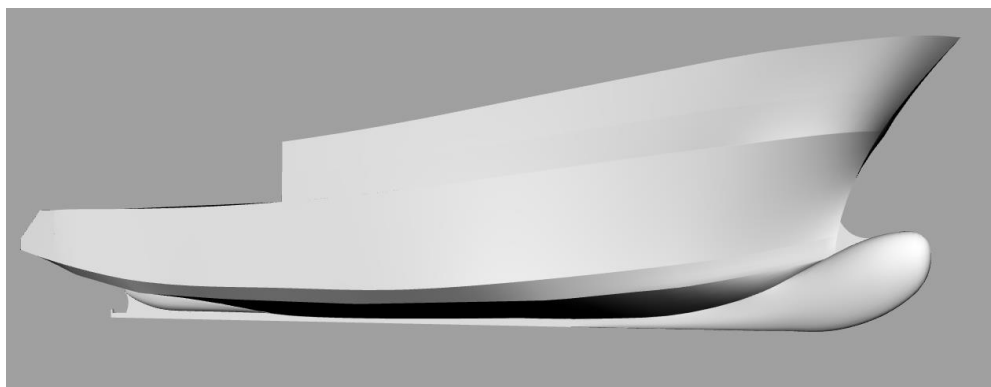


Figura No. 10 Vista en 3D del Atunero II. Fuente: Rhinoceros – Versión de prueba.

Eslora	[m]	49.50
Eslora entre PP	[m]	42.73
Eslora de flotación	[m]	46.02
Manga	[m]	7.92
Puntal	[m]	4.38
Asiento (+ a popa)	[]	0.66
Calado	[m]	4.02
Desplazamiento	[ton]	1003.00
Área de plano de agua	[m ²]	330.16
Coefficiente bloque	[]	0.60
Coefficiente de plano de agua	[]	0.89
LCB (+ a proa)	[m]	-1.66
LCF (+ a proa)	[m]	-3.23
Centro de gravedad	[m]	3.38
Altura metacéntrica transversal	[m]	0.632
Altura metacéntrica longitudinal	[m]	49.91
Velocidad del buque	[nudos]	11.0
Periodo natural de rolido	[seg]	8.06

Tabla II. Características principales de Atunero II.

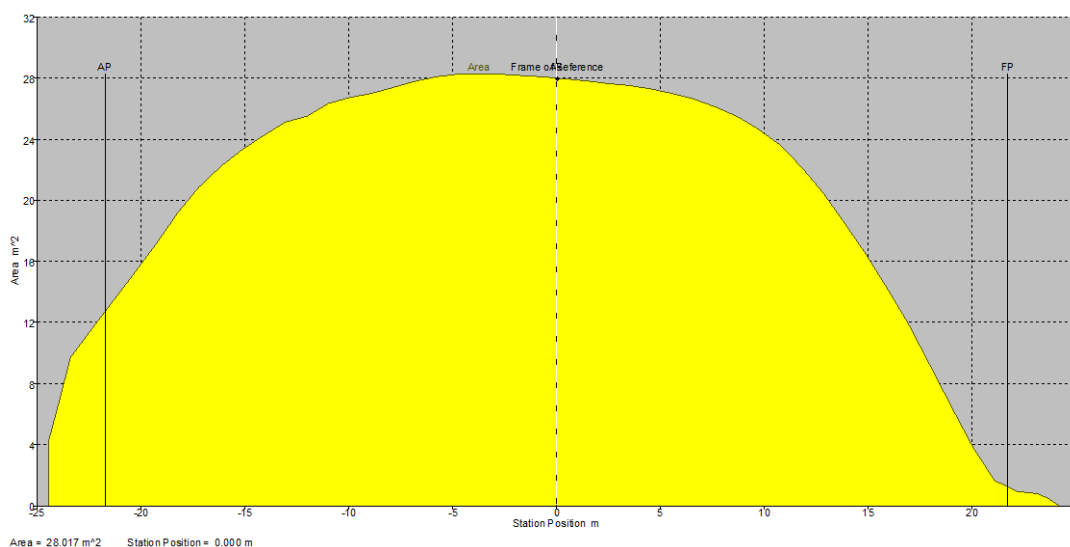


Figura No. 11 Curva de áreas Atunero II. Fuente: Maxsurf 20, Modulo: Modeler, versión de prueba.

2.2 Condición de carga

El libretto de estabilidad de cada buque permitió establecer la condición de máxima carga y sus propiedades hidrostáticas. Este tipo de buques se encuentran plenamente cargados en un 85% del perfil operacional.

2.2.1 Atunero I - 65% Cubas, 85% Tanques

La Tabla III y Tabla IV se describe en detalle la condición de carga, incluyendo las cubas y los tanques incorporados a la maqueta 3D y al software de estabilidad(Maxsurf) para consideraciones de calibración y superficie libre.

Ítem	Cantidad	Unidad de masa [ton]	Masa total [ton]	Brazo Long. [m]	Brazo Trans. [m]	Brazo Vert. [m]
Ligero Exp. Inclinación	1	435.940	435.940	1.670	0.000	3.880
Total – Ligero			435.940	1.670	0.000	3.880
Cuba BB No. 1	75%	46.293	34.720	-8.312	2.107	2.777
Cuba BB No. 2	55%	51.225	28.174	-3.214	1.986	2.454
Cuba BB No. 3	50%	65.361	32.680	3.719	1.788	2.479
Cuba EB No. 3	50%	65.361	32.680	3.719	-1.788	2.479
Cuba EB No. 2	55%	51.225	28.174	-3.214	-1.986	2.454
Cuba EB No. 1	75%	46.293	34.720	-8.312	-2.107	2.777
SubTotal - Cubas	58.68%	325.756	191.147	-2.695	0.000	2.580
Tk. Comb. BB 1	95%	25.179	23.920	-18.387	2.381	3.820
Tk. Comb. EB 1	95%	25.179	23.920	-18.387	-2.381	3.820
Tk. Comb. BB 2	55%	21.633	11.898	-13.888	-3.015	2.765
Tk. Comb. EB 2	95%	9.902	9.407	-15.197	3.021	3.494
Tk. Comb. EB 3	95%	3.570	3.392	-12.839	2.985	2.220
Tk. Agua BB	95%	2.093	1.988	-15.930	-1.580	3.101
Tk. Comb. DF BB 1	75%	22.939	17.204	2.606	-1.193	0.805
Tk. Comb. DF BB 1	95%	18.215	17.305	-5.567	1.250	0.912
Tk. Comb. DF EB 1	95%	18.215	17.305	-5.567	-1.250	0.912
Tk. Comb. DF BB 2	75%	22.939	17.204	2.606	1.193	0.805
Tk. Comb. proa BB	95%	4.327	4.111	11.211	1.298	1.484
Tk. Comb. SM proa	95%	5.034	4.782	14.579	0.000	1.470
Tk. Comb. proa EB	95%	4.327	4.111	11.211	-1.298	1.484
Tk. Aceite sucio	95%	3.464	3.291	10.420	0.000	1.275
Tk. Aceite limpio	95%	3.021	2.870	12.119	0.000	1.370
Tk Aceite Hidráulico	95%	8.002	7.602	14.516	0.000	2.560
SubTotal - Tanques	86%	198.041	170.311	-6.017	-0.003	2.162
Tripulación	1	0.780	0.780	3.700	0.000	5.400
Equipos	1	0.200	0.200	12.600	0.000	3.360
Panga	1	8.000	8.000	-20.570	0.000	3.920

Tabla III. Desagregación de pesos en Maxsurf Módulo de Estabilidad, Atunero I – Parte 1/2.

Ítem	Cantidad	Unidad de masa [ton]	Masa total [ton]	Brazo Long. [m]	Brazo Trans. [m]	Brazo Vert. [m]
Speed Boats	1	0.600	0.600	-1.190	3.600	5.850
Red	1	35.000	35.000	-14.850	0.000	4.810
Total extras			44.580	-15.245	0.048	4.668
Total Loadcase			803.3	-1.772	0.002	3.279
FS correction						0.256
VCG fluid						3.54

Tabla IV. Desagregación de pesos en Maxsurf Módulo de Estabilidad, Atunero I – Parte 2/2.

2.2.2 Atunero II, 65% cubas - 90% Tanques

Las Tabla V y Tabla VI presentan en detalle la condición de carga introducida al software de arquitectura naval, incluyendo peso ligero, cubas multipropósito y tanques de almacenamiento.

Ítem	Cantidad	Unidad de masa [ton]	Masa total [ton]	Brazo Long. [m]	Brazo Trans. [m]	Brazo Vert. [m]
Ligero Exp. Inclinación	1	532.880	532.880	-1.790	0.000	3.110
Cuba BB 1	65%	9.803	6.372	-13.976	2.868	3.042
Cuba BB 2	65%	46.537	30.249	-5.681	1.955	2.880
Cuba BB 3	65%	55.663	36.181	0.990	1.956	2.491
Cuba BB 4	65%	55.757	36.242	7.392	1.984	2.542
Cuba EB 1	65%	9.190	5.973	-14.069	-2.834	3.023
Cuba EB 2	65%	46.537	30.249	-5.681	-1.955	2.880
Cuba EB 3	65%	55.663	36.181	0.990	-1.956	2.491
Cuba EB 4	65%	55.757	36.242	7.392	-1.984	2.542
SubTotal Cubas	65%	334.907	217.689	0.416	0.006	2.647
Tk Comb. BB 1	95%	15.797	15.007	-21.776	2.894	3.293
Tk Comb. EB 1	95%	15.796	15.007	-21.776	-2.894	3.293
Tk Comb. BB 2	95%	11.251	10.688	-18.553	2.932	3.011
Tk Comb. EB 2	60%	23.538	14.123	-17.331	-2.925	2.436
Tk Comb. Eb 3	95%	3.574	3.396	-16.234	2.880	1.794
Tk Comb. DB BB 2	95%	12.200	11.590	-4.943	1.621	0.845
Tk Comb. DB EB 2	95%	12.179	11.570	-4.934	-1.618	0.845
Tk Comb. DB BB 1	95%	0.800	0.760	-13.444	2.651	1.110

Tabla V. Desagregación de pesos en Maxsurf Módulo de Estabilidad, Atunero II – Parte 1/2.

Ítem	Cantidad	Unidad de masa [ton]	Masa total [ton]	Brazo Long. [m]	Brazo Trans. [m]	Brazo Vert. [m]
Tk Comb. DB EB 1	95%	0.722	0.686	-13.580	-2.559	1.108
TK Comb. DB BB 3	95%	27.137	25.780	3.240	1.464	0.859
TK Comb. DB EB 3	95%	28.137	26.730	3.334	-1.540	0.867
TK Comb. DB BB 4	95%	1.544	1.467	10.464	1.839	1.021
TK Comb. DB EB 4	95%	1.562	1.484	10.454	-1.851	1.021
TK Comb. DB SM	95%	25.225	23.964	13.813	0.000	1.289
Tk Comb. proa BB	95%	3.231	3.069	14.887	1.793	2.077
Tk Comb. proa EB	95%	3.231	3.069	14.887	-1.793	2.077
Tk de Aceite en proa	95%	14.024	13.323	19.515	0.000	3.998
Tk Agua en proa	95%	22.009	20.909	20.164	0.000	5.910
SubTotal Tanques	91.29%	221.958	202.622	0.108	-0.017	2.278
Viveres	1	0.800	0.800	1.800	0.000	5.500
Tripulantes	1	1.500	1.500	1.400	0.000	5.700
Red	1	35.000	35.000	-17.000	0.000	6.500
Speed Boat	1	2.400	2.400	-5.600	0.000	6.400
Panga	1	10.000	10.000	-23.900	0.000	5.700
SubTotal extras			49.700	-16.980	0.000	6.294
Total Loadcase			1002.891	-1.680	-0.002	2.999
FS correction						0.386
VCG fluid						3.385

Tabla VI. Desagregación de pesos en Maxsurf Módulo de Estabilidad, Atunero II – Parte 2/2.

2.3 Criterios de Estabilidad de Primera Generación

2.3.1 Criterio de J. Ramon

Criterio elaborado durante la Tesis Doctoral de J. Ramón y de la cual recibe su nombre, y remarcado por Pascual O' Dogherty [11].

Este criterio propone fijar los mínimos valores de diversos parámetros de estabilidad en buques pesqueros, y consideraciones especiales cuando se trata de atuneros, entre los cuales se encuentran:

- Valores referenciales de GM/B en salida y llegada a puerto.

$$\text{Salida de puerto: } GM \geq 0.14 * B - 0.006 B^2 \quad (2. 1)$$

$$\text{Llegada de puerto: } GM \geq 0.17 * B - 0.01 B^2 \quad (2. 2)$$

- Valor mínimo de GM,

$$GM \geq \frac{p * A_v * z}{\Delta * tg(\theta)} \quad (2. 3)$$

Donde θ corresponde el ángulo de escora correspondiente a la inmersión de la mitad del francobordo, u 8° si $\theta > 8^\circ$.

- Criterio de estabilidad dinámica,

$$e_k \geq 0.023 \Delta^{1/3} \quad (2. 4)$$

- Criterio del mínimo GZ alcanzado por la curva

$$GZ_{m,atunero} \geq 0.028 * B \quad (2. 5)$$

- Valor mínimo de ángulo final de estabilidad.

$$\theta_k \geq 75^\circ \quad (2. 6)$$

Si todos los criterios antes presentados se cumplen satisfactoriamente, la nave se considera estable.

Por motivos de volumen de cálculos, solo le evaluará los criterios de estabilidad de J Ramón en la condición de máxima carga, y como resumen de los mismo se presenta la Tabla VII:

	Parámetro	Atunero I	Atunero II
	Lpp[m]	38.48	42.73
	B[m]	7.92	7.92
	P[m]	4.72	4.38
	Desplazamiento[Ton]	803.30	1003.0
GM referencial en salida de puerto	GM - inicial[m]	0.544	0.632
	$GM_{min, salida}$ [m]	0.732	0.732
		FALLA	FALLA
GM mínimo, incluyendo el área vélica	presión de viento, $\rho \left[\frac{Ton}{m^2} \right]$	0.056	0.056
	z[m]	5.43	4.78
	ángulo de escora de la inmersión de la mitad de francobordo [°] u 8°	4.7	3.01
	área vélica [m ²]	194.72	199.84
	$GM_{min, por\ área\ vélica}$ [m]	0.897	1.015
		FALLA	FALLA
Criterio de estabilidad dinámica	$0.023 * \Delta^{1/3}$	0.21	0.23
	e_k	0.267	0.343
		CUMPLE	CUMPLE
Criterio de mínimo GZ alcanzado	GZ_{max} [m]	0.27	0.37
		0.222	0.222
		CUMPLE	CUMPLE
Ángulo final de la curva GZ	θ_k	115°	103°
		CUMPLE	CUMPLE

Tabla VII Tabla comparativa del criterio de Pascual O'Dogherty.

2.3.1.1 Propuesta de límites de aplicabilidad de J. Ramón

Una vez realizada la aplicación del criterio de J. Ramón en las dos embarcaciones Atuneras de características similares y la no disponibilidad la tesis original por el tiempo de la publicación (1972), como aporte de la presente tesis se ha realizado un análisis de regresión de los principales enunciados del criterio de J. Ramón.

2.3.1.1.1 Respetto de los valores referenciales de GM

Utilizando una gama de valores de manga con un intervalo de incremento de 0.5 [m], se obtienen las Figura No. 12 y Figura No. 13, las mismas que son incorporadas a las fórmulas de GM referencial del criterio de J. Ramón.

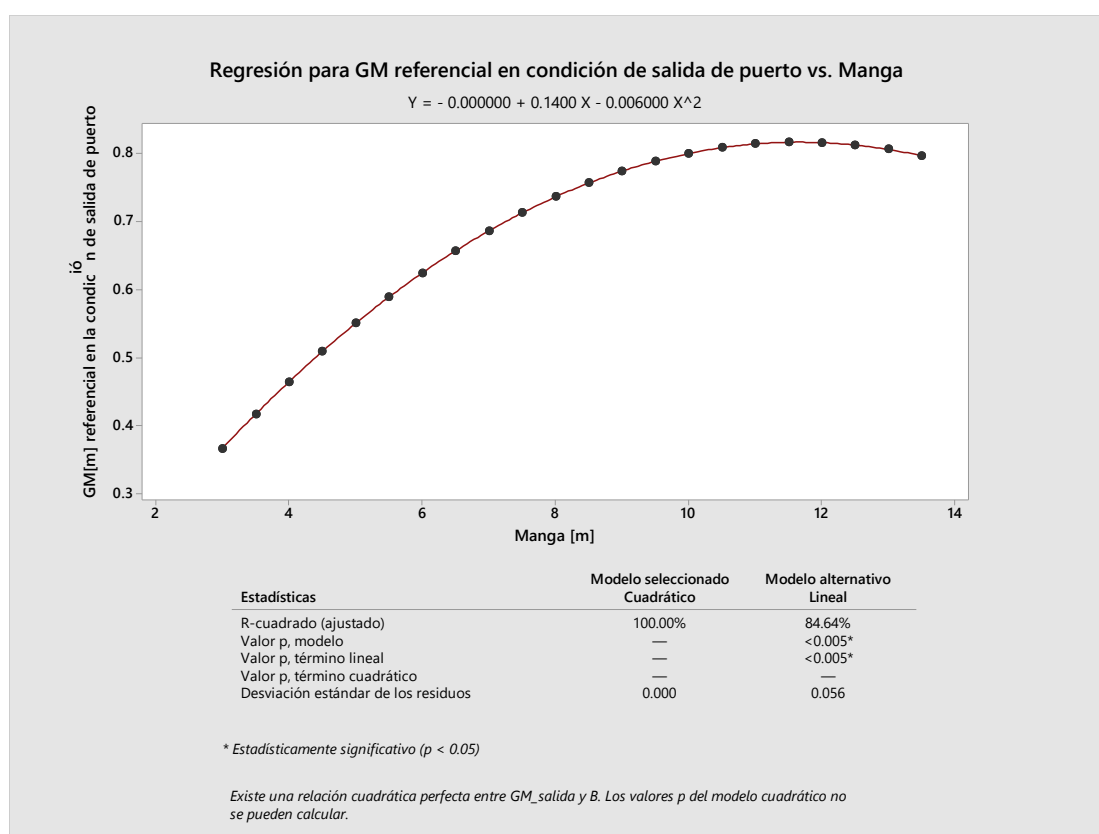


Figura No. 12 Regresión de GM en la condición de salida de puerto. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

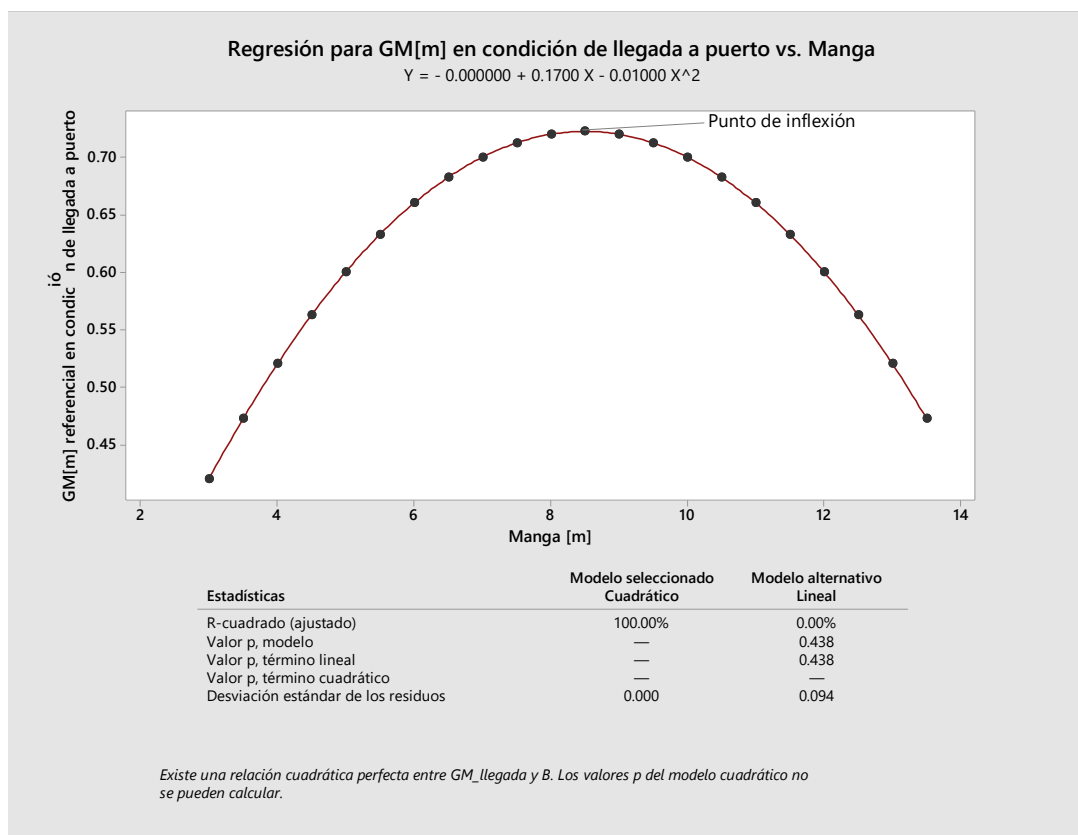


Figura No. 13 Regresión de GM en la condición de llegada a de puerto. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

En la determinación de los GM referenciales para la condición de llegada a puerto, se produce un punto de inflexión con manga 8.5 [m], es decir, por ejemplo: los valores que recomienda el criterio para atuneros de altura con manga 12, equivale a 0.6 [m] que si bien es superior al requerido por el Código IS [1] igual 0.35 [m], se debería tener en consideración la disminución del GM_t con la ola de quebrando o cresta.

2.3.1.1.2 Respecto de la presión de viento sugerida por el autor

De igual manera, con una gama de eslora establecida, en intervalos de 5 [m], han sido utilizados para ingresar a la presión de viento para el cálculo del mínimo GM, los resultados se presentan en la Figura No. 14.

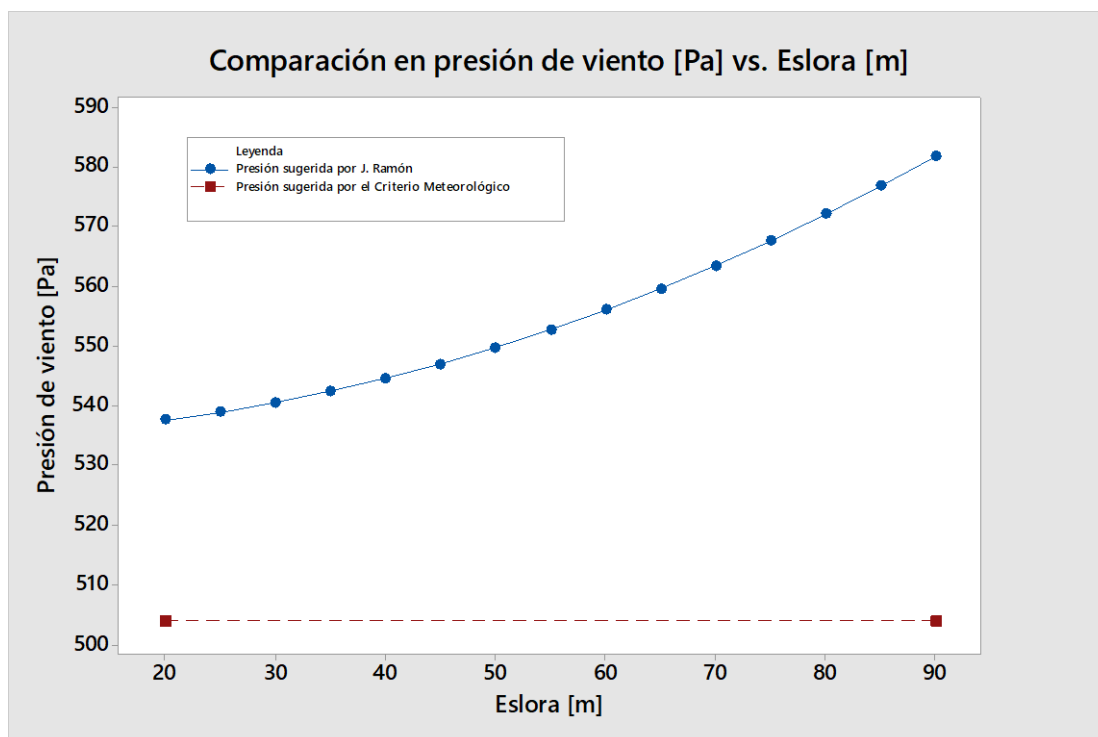


Figura No. 14 Comparación de la presión de viento sugiera por J. Ramón y la presión del criterio meteorológico. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Se puede apreciar que la diferencia entre la presión de 504 [Pa], valor requerido por el criterio meteorológico y los valores calculados con el criterio de J. Ramon, los últimos crecen cuadráticamente, en caso de atuneros de altura, esta presión llega a tener un valor excesivo para el criterio del Autor de la tesis, lo que generaría un valor de GM muy alto y posiblemente exagerado.

2.3.1.1.3 Respecto de valor mínimo de la curva GZ

Se calcula el GZ mínimo requerido por el criterio de GZ para buques atuneros, en sentido comparativo se utiliza el brazo adrizante mínimo por el código IS 0.2 [m] a 30° o más. Los resultados se presentan en la Figura No. 15.

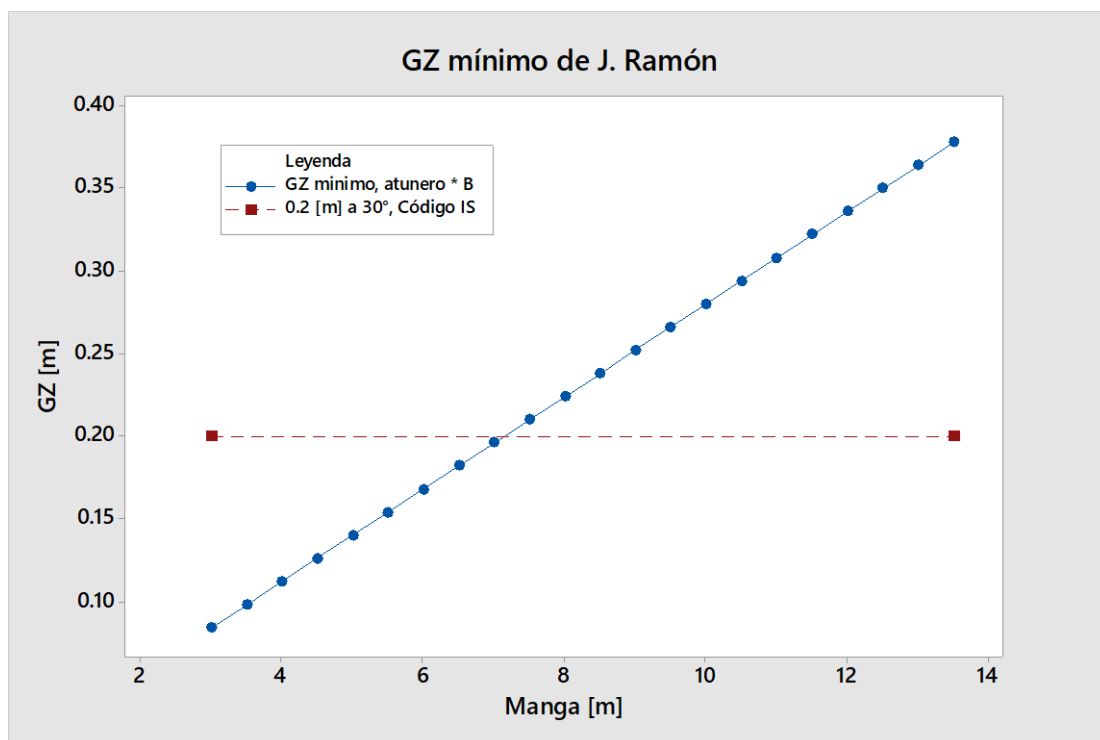


Figura No. 15 Comparación de GZ mínimo por J. Ramón y GZ mínimo a 30° o más del código IS. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Finalmente se puede apreciar la tendencia lineal de la curva y que para mangas 12 [m] en adelante son valores elevados en cambio para valores con manga inferior a 7 [m] son inferiores al recomendado dado por OMI [1].

Por los tres puntos analizados al criterio de J. Ramón se puede proponer nuevos límites de aplicación de eslora y manga, siendo las ecuaciones (2.7) (2.8) los resultados:

$$7[m] \leq Manga \leq 12[m] \quad (2.7)$$

$$20[m] \leq Eslora \leq 70[m] \quad (2.8)$$

Resaltando que ambas embarcaciones atuneras se encuentran dentro de estos rangos de aplicabilidad propuestos.

2.3.2 Criterio de Pascual O'Dogherty [11]

El criterio fue elaborado con una gran cantidad de informes de estabilidad de buques pesqueros Españoles, de los cuales un grupo se conoce que zozobraron, mientras que el otro grupo han demostrado sus favorables condiciones de estabilidad.

El criterio consiste en la ponderación de las dos principales características de estabilidad:

- Altura metacéntrica, GM
- La integración curva de estabilidad dinámica, θ_k

El criterio emplea el coeficiente adimensional de estabilidad

$$C_E = E_1 + E_2 \quad (2.9)$$

Donde E_1 no debe ser menor que los siguientes valores:

$$E_1 = 50 * \frac{GM}{B} \quad (2.10)$$

$$E_1 \text{ Límite} = 8 - 0.12 * L_{PP} + 0.0006L_{PP}^2 \quad (2.11)$$

Estando E_2 dado por la fórmula:

$$E_2 = 1000 * \frac{\theta_k}{L_{PP}} \quad (2.12)$$

Se considera que un buque pesquero cumple con este criterio si:

$$C_E = E_1 + E_2 \geq C_E \text{ mínimo} \quad (2.13)$$

El valor de C_E mínimo se determina con la Figura No. 16:

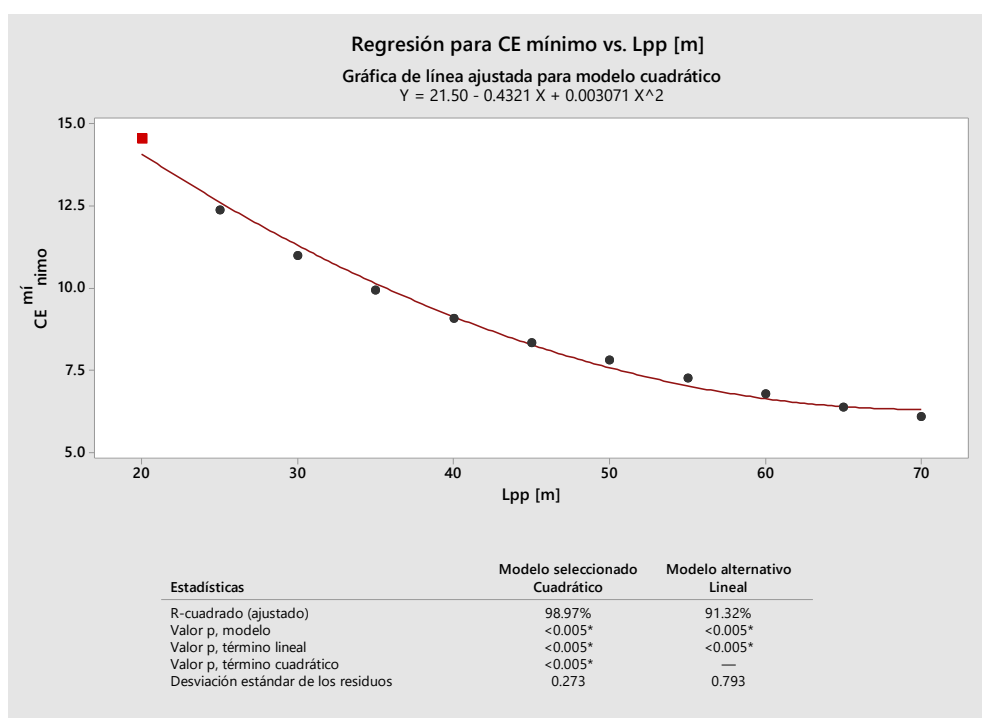


Figura No. 16 Coeficiente Ce mínimo propuesto por O'Dogherty. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Una vez ingresados los datos principales y la curva de brazos adrizantes GZ, θ_k , es posible encontrar los parámetros exigidos por el criterio.

La Tabla VIII presenta los resultados de la aplicación del criterio de ODogherty, obteniendo como resultado que los 2 atuneros cumplen con el criterio. El Atunero II cumple el criterio con una diferencia de 3.77, mientras que el Atunero I solo con 1.25; es decir el Atunero II posee un mayor margen de estabilidad.

Parámetro	Atunero I	Atunero II
Lpp[m]	38.48	42.73
B[m]	7.92	7.92
P[m]	4.72	4.38
D[m]	4.38	4.02
GM[m]	0.544	0.632
e_k	0.267	0.343
E1 límite	4.178	3.886
E1	3.598	3.851
E2	6.94	8.02

Ce	10.536	11.873
Ce mínimo	9.395	8.74
	CUMPLE	CUMPLE

Tabla VIII. Tabla comparativa del criterio de O'Dogherty.

2.3.2.1 Propuesta de corrección en la curva 'Ce mínimo'

Una vez verificado en la tabla VII que ambas embarcaciones cumplen con el criterio de O'Dogherty, y previamente conociendo que el buque pesquero 'Atunero I' zozobro cercana a las islas Galápagos [2], es necesario realizar una propuesta para mejorar al criterio presentado en 2.3.2. Observando los puntos de la curva Ce mínimo de las estadísticas de siniestros de barcos pesqueros dejan fuera a 5 embarcaciones, las mismas con las cuales se puede mejorar el criterio, dando como resultado la siguiente curva en la Figura No. 17:

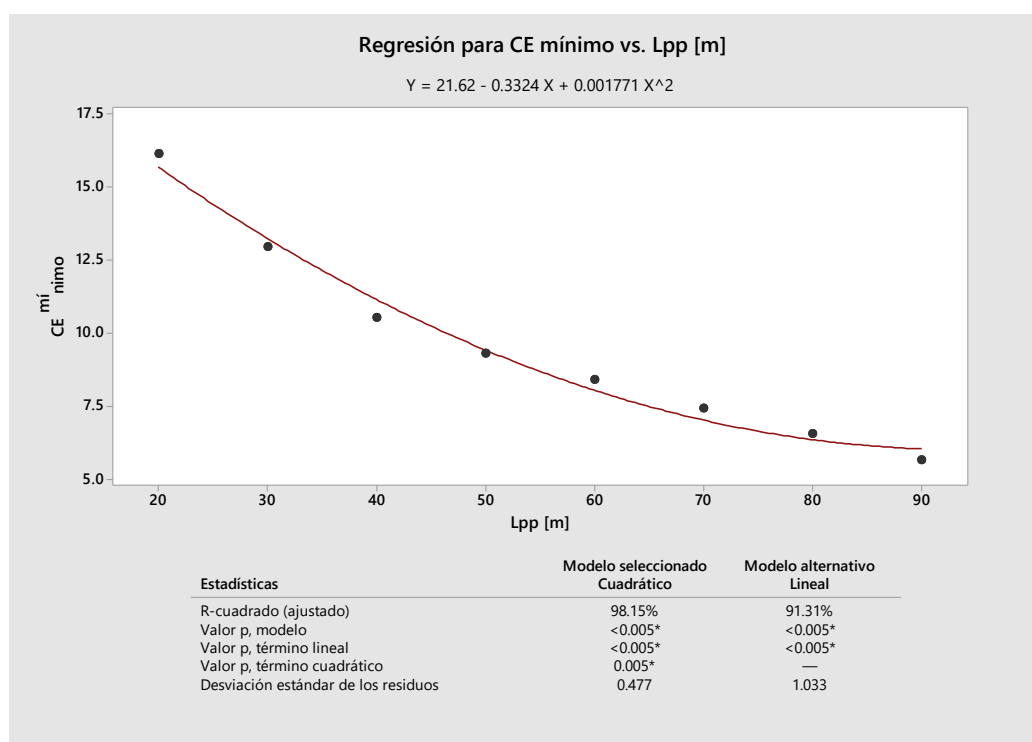


Figura No. 17 Curva Ce corregida, incluyendo todos los puntos de buques siniestrados.
Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Una vez corregidos los puntos, se procede a recalculer el criterio y los resultados son presentados en la Tabla IX:

Parámetro	Atunero I	Atunero II
Lpp[m]	38.48	42.73
B[m]	7.92	7.92
P[m]	4.72	4.38
D[m]	4.18	4.02
GM[m]	0.544	0.632
e_k	0.267	0.343
E1 límite	4.178	3.886
E1	3.598	3.851
E2	6.94	8.02
Ce	10.536	11.873
Ce mínimo	11.452	10.54
	FALLA	CUMPLE

Tabla IX. Tabla comparativa del criterio Ce mínimo modificado y aplicado en ambos buques atuneros.

Realizada la propuesta de corrección en la curva Ce, en esta ocasión se detecta inestabilidad por parte del Atunero I.

2.3.3 Criterio Hidrodinámico relativo al cabeceo [12]

En 1861 Froude demostró que la excitación del rolido se debe al paso de la ola y no la altura de esta. Mientras que Levadou [13] mostró la relación directa entre el cabeceo de la embarcación y el rolido del mismo, dado estas consideraciones se ha generado la figura de '*tendencia de sincronismo del cabeceo en mares irregulares de proa*', al que, en función de las dimensiones principales, se puede ingresar y verificar la severidad esperada del cabeceo en el diseño hidrodinámico de buques.

A seguir en la Tabla X se presentan los datos de entrada. En la Figura No. 18 la ubicación de ambos buques atuneros dentro del gráfico de severidad de cabeceo.

Parámetro	Atunero I	Atunero II
Eslora [m]	45.10	49.50
Volumen de desplazamiento [m ³]	783.71	978.54
Número de Froude []	0.257	0.257

Tabla X. Datos de entrada para el gráfico de severidad de cabeceo.

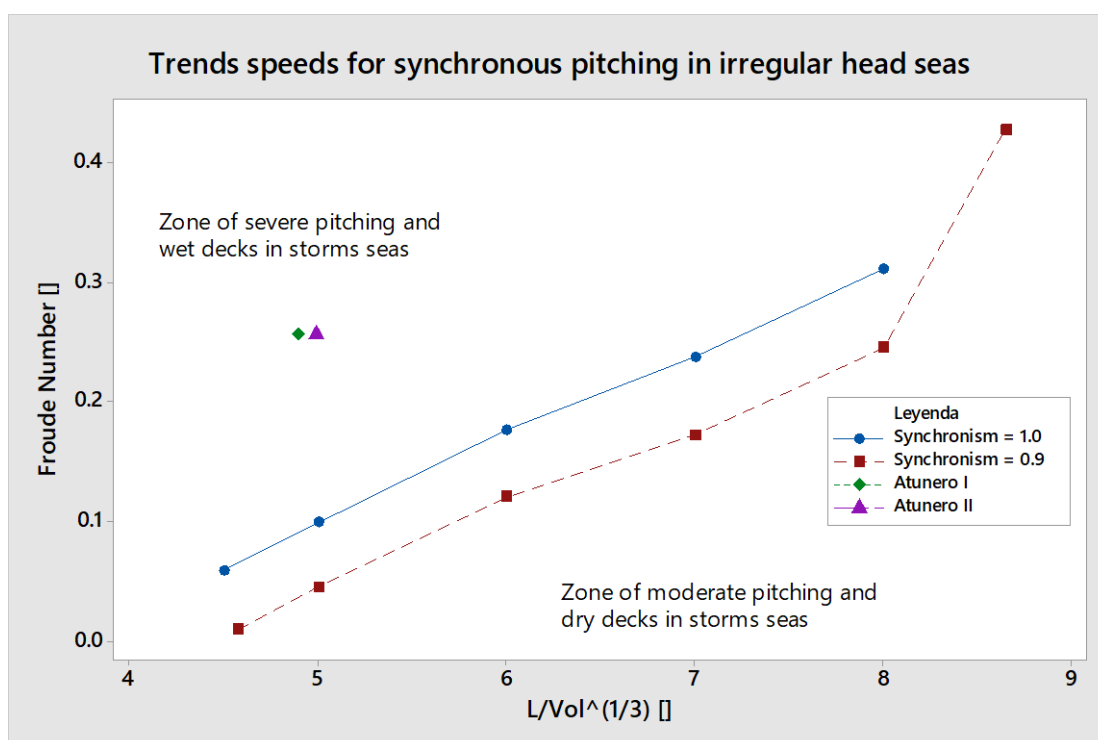


Figura No. 18 Resultados de ambos atuneros I y II dentro de la gráfica de severidad de cabeceo en el diseño hidrodinámico preliminar. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

2.3.4 Criterio Mandatorios de estabilidad, Resolución A.749(18) [1]

Para los cálculos de estabilidad de primera generación se ha utilizado el software Maxsurf 20.0, en su módulo de Estabilidad Avanzada, incluyendo los criterios de la Resolución A.749(18) - capítulo 04 y Circular MSC. 267(85) – capítulo 02. Para el módulo de estabilidad intacta ha sido necesario conocer como datos de entrada del buque: pesos desagregados, tanques de almacenamiento, bodegas refrigeradas y la condición de carga a la cual ha sido cargada cada uno.

Los criterios se describen brevemente a continuación:

- **Criterios de estabilidad mandatorios:** Todos los buques, de manera general, deben cumplir con los siguientes requisitos:
 - El GZ mínimo, a una escora mayor o igual a 30°, es de 0.20 metros.
 - El ángulo de escora mínimo, para obtener el GZ máximo, es de 25°.
 - El GM mínimo es de 0.35 metros, para buques pesqueros.
 - El área mínima, entre 0° y 30° bajo la curva de GZ, es 0.055 m rad.
 - El área mínima, entre 0° y 40° bajo la curva de GZ, es 0.095 m rad.
 - El área mínima, entre 30° y 40° bajo la curva de GZ, es 0.030 m rad.

2.3.5 Criterio Meteorológico, Resolución A.562(14)

Para este segundo criterio mandatorio por OMI se aplica el código internacional de estabilidad sin avería [1]. Se debe demostrar la capacidad del buque para resistir los efectos combinados del viento y olas en sentido perpendicular al buque.

El gráfico para entender cómo funciona el criterio se presenta en la Figura No. 19 incluyendo los pasos para evaluar las diferencias entre áreas 'a' y 'b'.

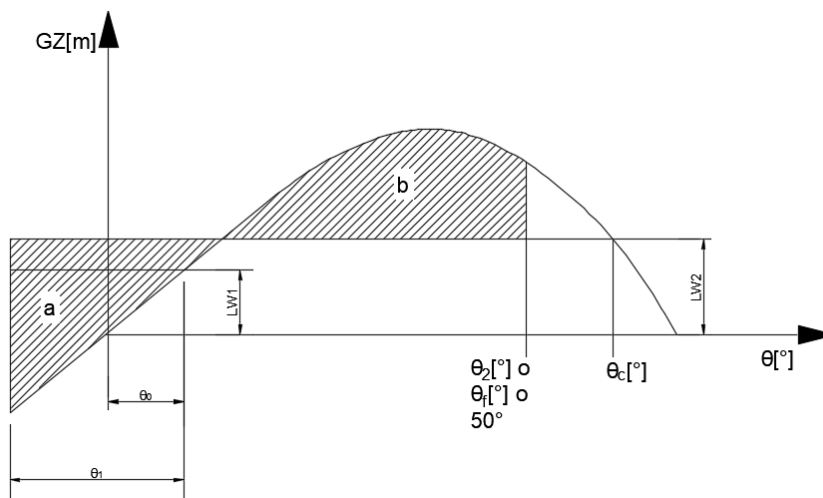


Figura No. 19 Cálculo de áreas a y b en criterios meteorológico. Fuente: [14]

- El buque se someterá a la presión de un viento constante que actúe perpendicularmente al plano de crujía, lo que dará como resultado el correspondiente brazo escorante (l_{w1}).
- A partir del ángulo de equilibrio resultante (θ_0) se supone que el buque se balancea por la acción de las olas hasta alcanzar un ángulo de balance (θ_0) a barlovento. El ángulo de escora provocado por un viento constante (θ_0), no deberá exceder los 16° o al 80% del ángulo de inmersión del borde de cubierta, si este ángulo es menor.
- El buque se someterá a la presión de una ráfaga de viento que dará como resultante el correspondiente brazo escorante (l_{w2}).
- En estas circunstancias, el área 'b' debe ser igual o superior al área 'a'.

Los datos de entrada para el segundo criterio mandatorio por la OMI se presentan en la Tabla XI.

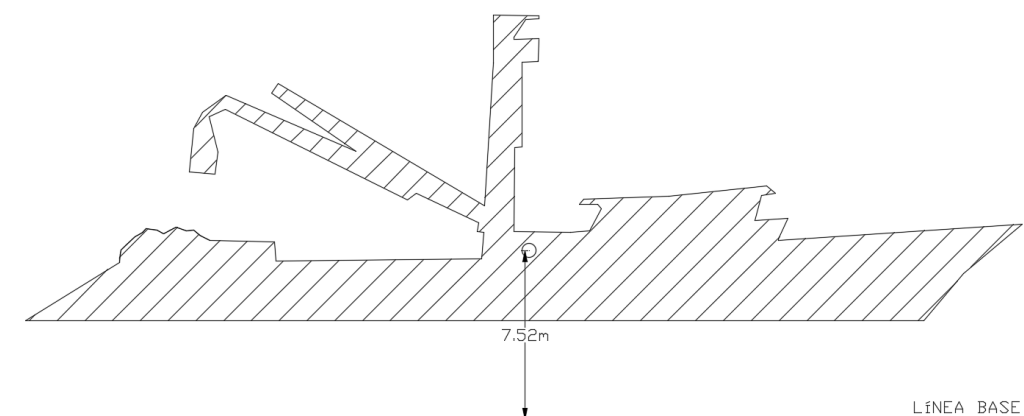


Figura No. 20 Cálculo del centroide y área velica, Atunero I

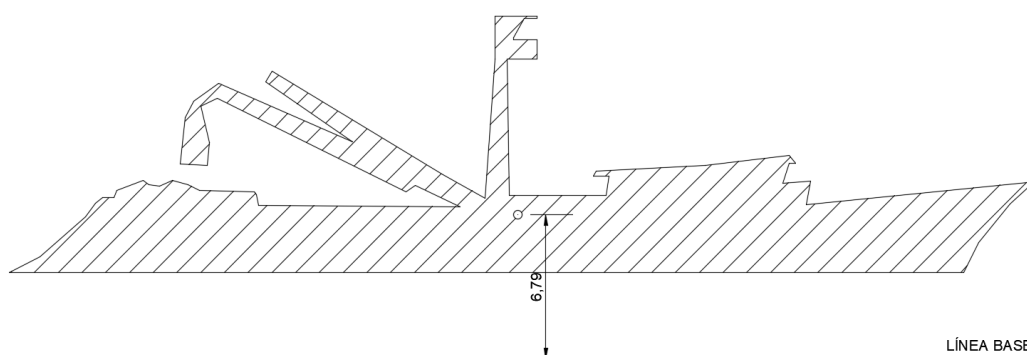


Figura No. 21 Cálculo del centroide y área velica, Atunero II.

Parámetro	Atunero I	Atunero II
Área velica [m ²]	194.72	199.84
Centroide del área velica, desde la línea base [m]	7.52	6.79
Área enquilladura [m ²]	7.35	9.2

Tabla XI. Datos de entrada para la aplicación del criterio Meteorológico.

Una vez calculados los parámetros de ingreso es posible ingresar estos valores al programa de arquitectura naval.

En la Figura No. 20 y Figura No. 21 se presentan las áreas velicas resultantes para cada buque en una representación de AutoCAD.

Mientras que en la Figura No. 22 y Figura No. 24 se presentan las curvas GZ incluyendo los brazos lw_1 y lw_2 , en colores celeste y morado, con los que fue calculado el criterio meteorológico en cada caso.

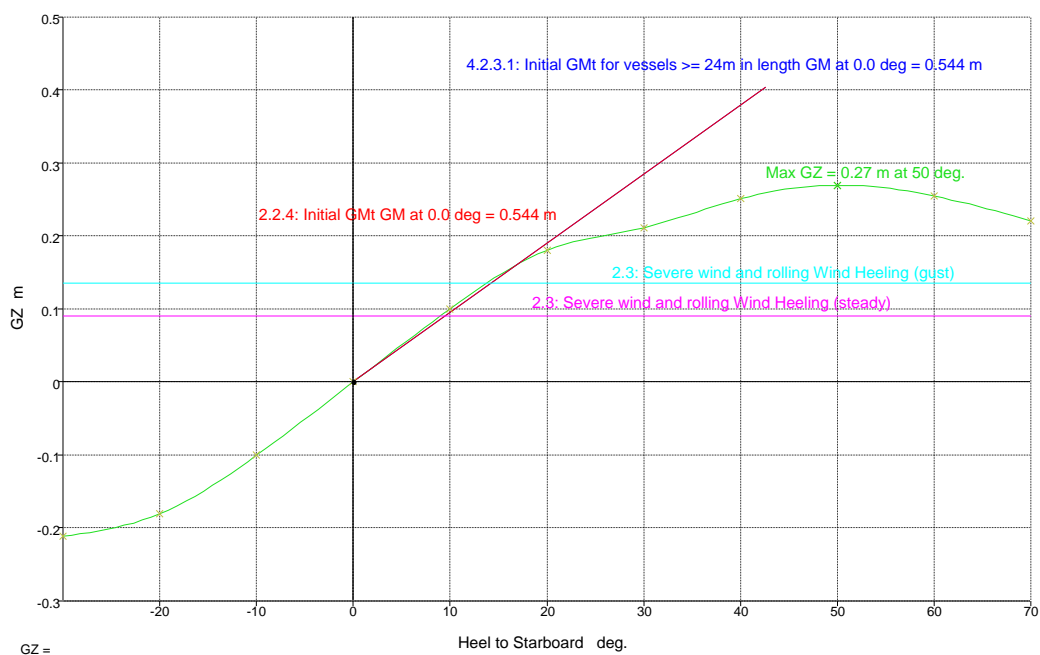


Figura No. 22 Curva de brazos adrizantes, Atunero I, condición de máxima carga. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.

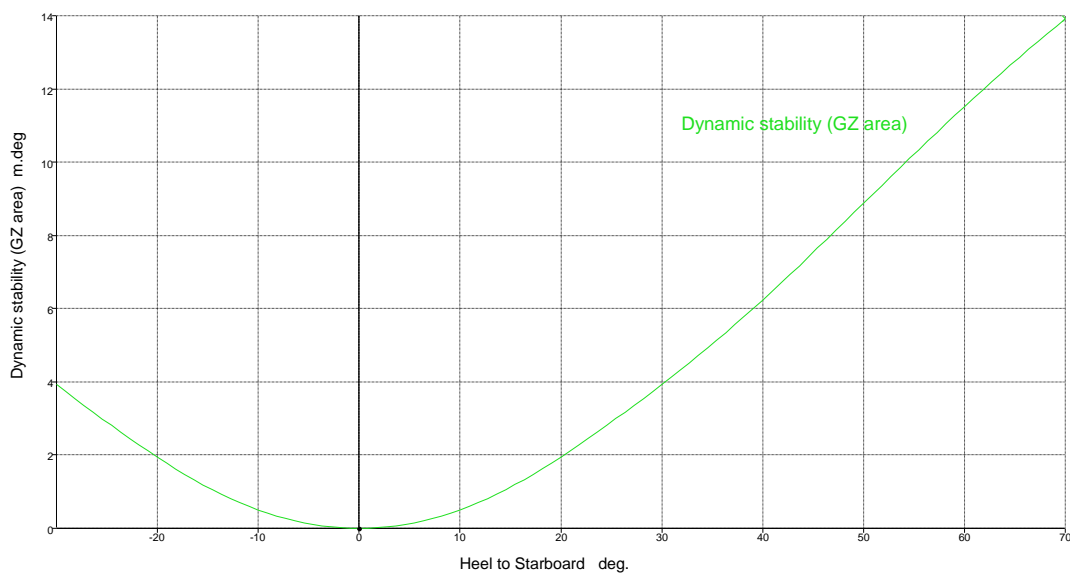


Figura No. 23 Curva de estabilidad dinámica a máxima carga, Atunero I. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.

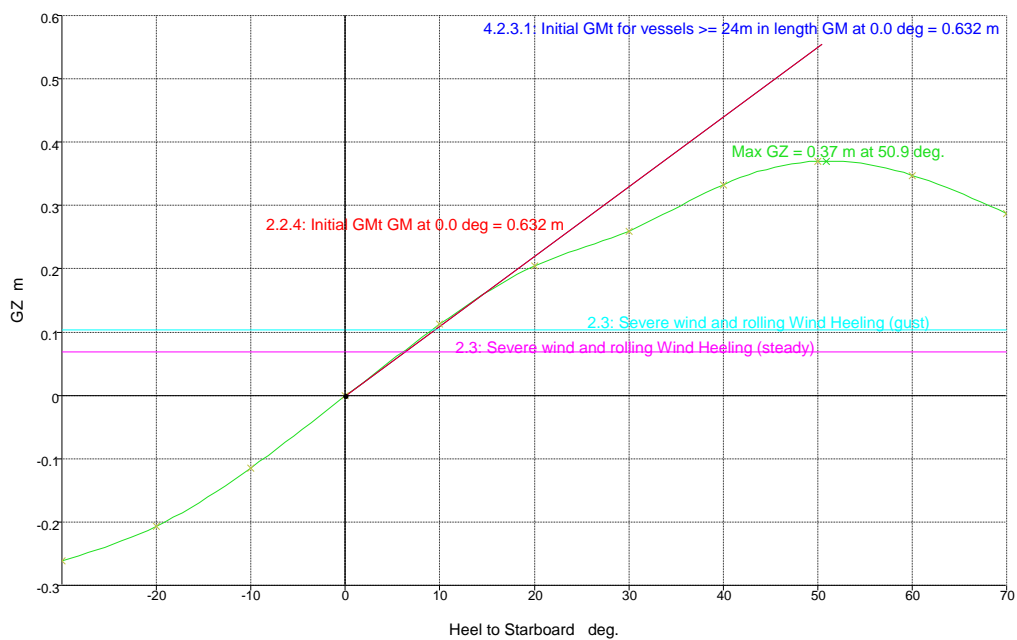


Figura No. 24 Curva de brazos adrizantes, Atunero II, condición a máxima carga. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.

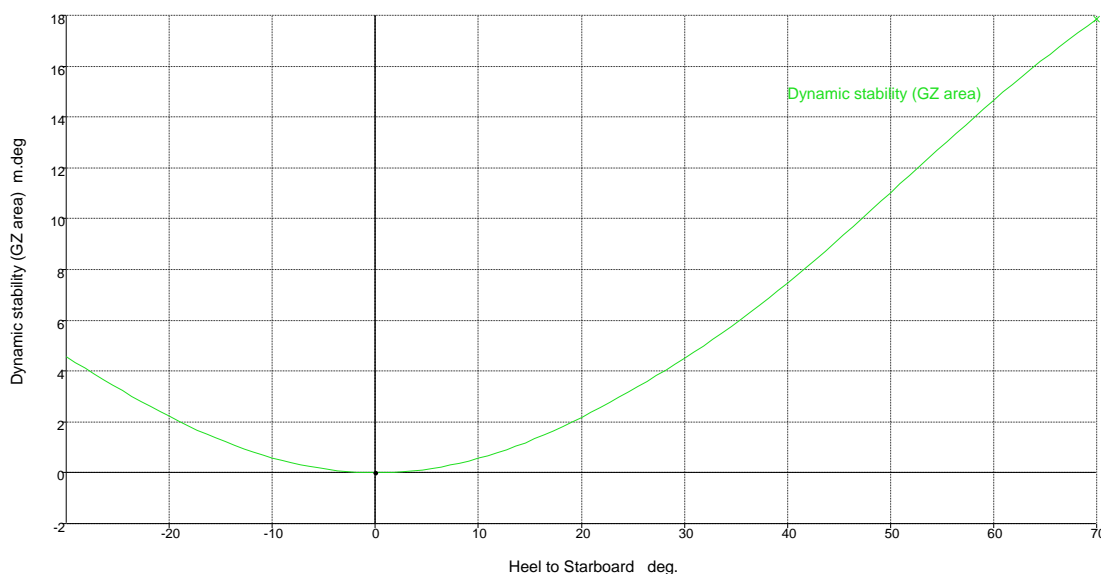


Figura No. 25 Curva de estabilidad dinámica a máxima carga, Atunero II. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.

De la Tabla XII se puede observar que el Atunero I, cumple el criterio meteorológico con un margen superior de 110.93%, mientras que el atunero II cumple con margen superior de al menos 213.05%. Esto, en gran medida, se debe a la relación en el área velica y el GM inicial de cada una de las embarcaciones.

Resultados	Atunero I	Atunero II
Área 0 a 30° [m deg]	3.93	4.50
Área 0 a 40° [m deg]	6.24	7.46
Área 30 a 40° [m deg]	2.31	2.96
GZ máximo en 30° o más	0.27	0.37
Ángulo de máximo GZ [°]	50	50.9
GM[m]	0.544	0.632
Criterios Mandatorios	CUMPLE	CUMPLE
θ_0	9.7	13.8
θ_1	18.7	19.9
Área 1/ Área 2[%]	110.93	213.05
T [seg]	8.602	8.059
Criterio Meteorológico	CUMPLE	CUMPLE

Tabla XII. Resultados de los criterios mandatorios de la OMI, aplicados con ola 'flat'.

2.4 Análisis de Resultados

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en el presente capítulo:

Condición de carga

- ✓ Se estableció la condición de carga en ambos buques atuneros, punto de partida para la evaluación con los distintos criterios de estabilidad tanto de primera como segunda generación.

Criterio J. Ramón

- ✓ En caso del criterio de J. Ramón, ambas embarcaciones no cumplen con los criterios relacionados la altura metacéntrica, pero si cumplen con los criterios relacionados a las propiedades de la curva GZ de este criterio.

Criterio de Pascual O'Dogherty

- ✓ Siguiendo el criterio tal como ha sido propuesto por Pascual O'Dogherty se determinó que ambas embarcaciones atuneras cumplen con el criterio de para buques pesqueros. Pero una vez realizada la corrección a curva C_e mínimo, el Atunero I se encuentra en la zona de inestabilidad.

Criterio Hidrodinámico relativo al cabeceo

- ✓ Incorporando el cálculo del número de Froude se determinó que las embarcaciones se encuentran dentro de la zona de cabeceo severo.

Criterios de estabilidad de Primera Generación

- ✓ Los dos buques atuneros satisfacen los criterios asociados la curva de brazos adrizantes y requeridos por la OMI como mandatorios [1].
- ✓ Al realizar el cálculo del criterio meteorológico de ambas embarcaciones se tiene como resultado que el Atunero I cumple con margen escaso (110.93 %), mientras que el Atunero II lo satisface en gran medida (213.05%).

- ✓ En forma general se puede decir que de acuerdo al análisis de los criterios de estabilidad de primera generación, se evidencia que el Atunero II tiene una reserva de estabilidad mayor que el Atunero I. Esto gran medida, se debe a la variación de puntal y centro de gravedad de ambas embarcaciones.

CAPÍTULO 3

3. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD: SEGUNDA GENERACIÓN – PRIMER NIVEL DE VULNERABILIDAD

Los Criterios de Estabilidad Intacta de Segunda Generación se basan ponderaciones que sean capaces de enfrentar los tres modos fundamentales de falla:

- Problemas en variación de brazos adrizantes, modos de falla vinculados con el rolido paramétrico y la pérdida estabilidad;
- Problemas de maniobrabilidad en olas, relacionados con el surfeo; y
- Condición de buque sin propulsión y gobierno,

Cada modo de falla de estabilidad dinámica obedece a un modelo matemático, el mismo que se ha resuelto de tal manera que el esfuerzo computacional para llevar a la predicción de la zozobra se pueda determinar a través de niveles de vulnerabilidad.

3.1 Criterio Stefan Krueger [15] – Relativo a problemas la variación de curva GZ en olas

El criterio de Krueger se considerará como criterio adicional a la estabilidad intacta aplicable a todos los tipos de buques incluidos en los instrumentos de la OMI.

El criterio relaciona el cambio de energía de la curva de brazos adrizantes entre la posición de ola en arrufo, quebranto y la condición de la curva en aguas tranquilas, para una altura de ola (H_w) relacionada directamente con la longitud de ola (λ), dada por la regresión de un cuantil de 90% del espectro de ola de mar Atlántico norte:

$$H_{\omega}(\lambda) = 0.1351 \lambda^{0.7056} \quad (3.1)$$

De teorías validadas con modelos en tanques de pruebas, se conoce que la longitud de onda (λ) se debe encontrar entre el intervalo de 0.8 a 1.2 veces la eslora entre perpendiculares [13], por lo que para el análisis del criterio y buscando alturas de ola considerables, se utilizaran los valores propuestos en la tabla Tabla XIII, y en comparativo a estos valores se adiciona el paso de ola correspondiente a cada atunero de acuerdo criterio meteorológico [1].

	Atunero I	Atunero II
$\lambda = L_{pp} [m]$	38.48	42.73
$H(\lambda) [m]$	1.77	1.91
$\lambda = L_{pp} * 1.2 [m]$	46.17	51.27
$H(\lambda = L_{pp} * 1.2)[m]$	2.02	2.17
$\lambda_{\text{criterio meteorológico}} [m]$	38.48	42.73
$H_{\omega \text{criterio meteorológico}} [m]$	3.42	3.97

Tabla XIII. Datos de entrada para el análisis del criterio de Stefan Krueger, remarcado en color azul sugerencia del autor del proyecto.

Las áreas la curva GZ en aguas tranquilas 0 grados a 15 grados ($A_{15\text{Still}}$) y de 0 a 40 ($A_{40\text{Still}}$), tomará por lo menos el siguiente valor:

$$A_{15\text{agua calma}} = 0.5 * (A_{15\text{arrufo}} - A_{15\text{quebranto}}) \quad (3.2)$$

$$A_{40\text{agua calma}} = 0.75 * (A_{40\text{arrufo}} - A_{40\text{quebranto}}) \quad (3.3)$$

Si al evaluar el criterio no alcanza el valor mínimo de la ecuación (3.2) y (3.3) se considera el buque susceptible a la inestabilidad en olas. Este principio si bien no es una condición completa para evaluar la posibilidad de zozobra, representa una gran herramienta en las primeras etapas de diseño, siendo un principio similar para el cálculo de estabilidad en olas es aplicado en el Método de Nechaev [16].

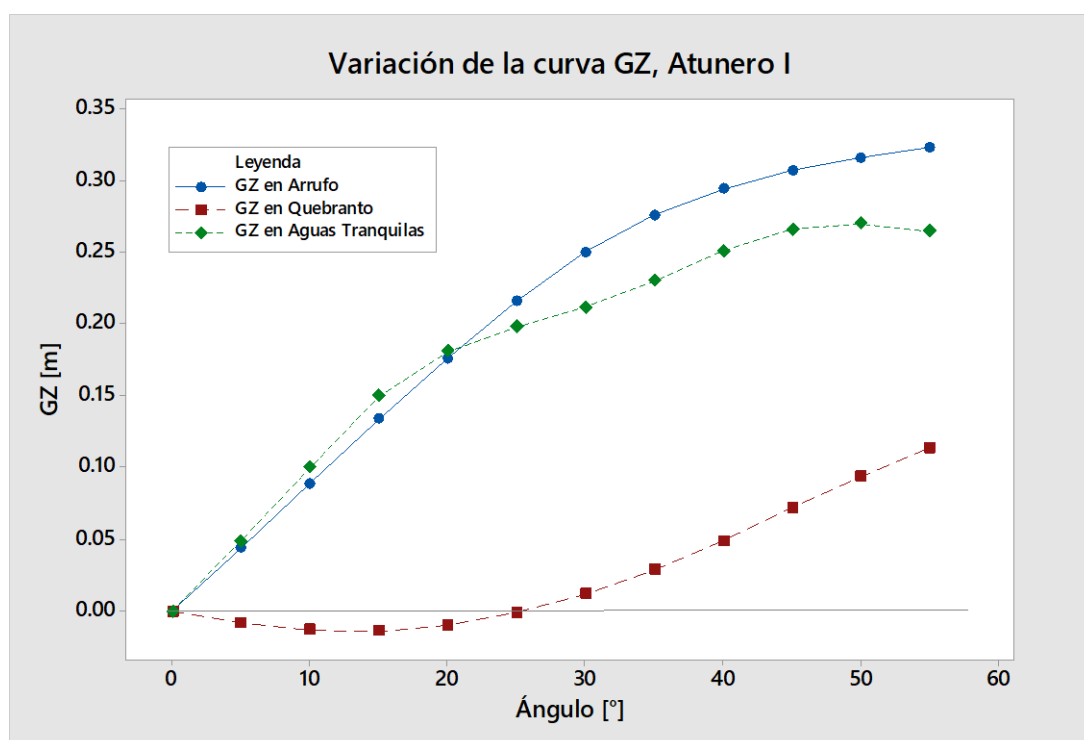


Figura No. 26 Variación de curva GZ, Atunero I, longitud de ola 38.48 [m] y altura de ola 3.42 [m]. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Resultados		$H(\lambda)$ = 1.77[m]	$H(\lambda * 1.2)$ = 2.02[m]	$H_{\omega_{meteorológico}}$ = 3.42[m]
Arrufo	Área hasta 15°	0.020	0.020	0.017
	Área hasta 40°	0.118	0.12	0.116
Quebranto	Área hasta 15°	0.011	0.012	-0.002
	Área hasta 40°	0.072	0.077	0.0014
Aguas Tranquilas	Área hasta 15°	0.010		
	Área hasta 40°	0.109		
Valor comparativo	En 15°	0.005	0.004	0.010
	En 40°	0.035	0.031	0.086
Criterio		CUMPLE	CUMPLE	FALLA

Tabla XIV. Resultados del Criterio de Krueger, Atunero I.

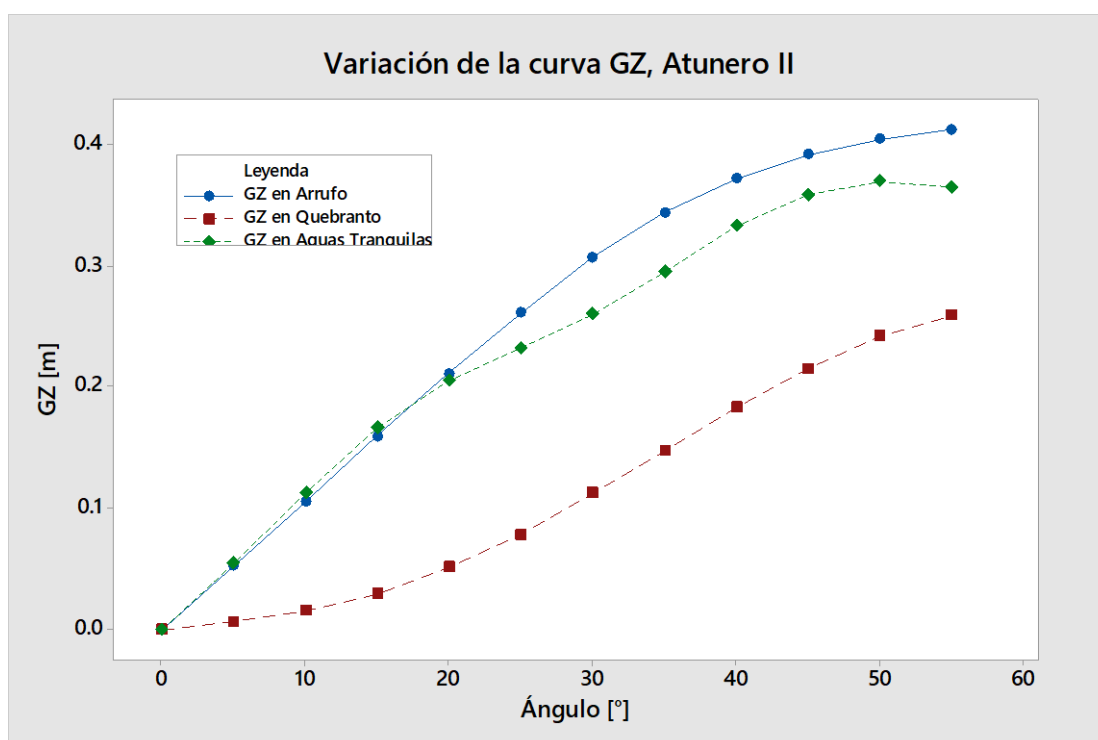


Figura No. 27 Variación de curva GZ, Atunero II, longitud de ola 42.73 [m] y altura de ola 3.97 [m]. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Resultados		$H(\lambda)$ = 1.91[m]	$H(\lambda * 1.2)$ = 2.17[m]	$H_{\omega_{meteorológico}}$ = 3.97[m]
Arrufo	Área hasta 15°	0.023	0.023	0.020
	Área hasta 40°	0.144	0.144	0.014
Quebranto	Área hasta 15°	0.015	0.015	0.002
	Área hasta 40°	0.097	0.099	0.045
Aguas Tranquilas	Área hasta 15°	0.022		
	Área hasta 40°	0.130		
Valor comparativo	En 15°	0.005	0.004	0.009
	En 40°	0.035	0.033	0.072
Criterio		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

Tabla XV. Resultados del Criterio de Krueger, Atunero II.

En la Figura No. 26 y Figura No. 27, se presenta las variaciones de la curva GZ para los dos buques atuneros en la condición con mayor altura de ola, de igual manera en

la Tabla XIV y Tabla XV se muestran los resultados del criterio de Krueger para cada Atunero en cada condición de ola.

Siguiendo los criterios de Stefan Krueger relacionado con las alturas de ola, ambos buques atuneros en estudio cumplen con los criterios, sin embargo, al considerar la altura de ola propuesta por el criterio meteorológico, se detecta que el Atunero I falla el criterio, no obstante el Atunero II no evidenciaría problemas de estabilidad.

3.2 Rolido Paramétrico

El proceso de análisis que se va a seguir y que servirá de herramienta para todos los modos de falla consiste en lo siguiente:

- Señalar la ruta de navegación, tanto de ida como de regreso.
- Identificar nodos equidistantes desde la salida de puerto hasta el caladero y viceversa, usando pronósticos meteorológicos en cada día de trayecto.
- Realizar los cálculos oceanográficos de las densidades espectrales y respuestas RAO, para estimar las alturas promedios, $H_{1/3}$, $H_{1/10}$, $H_{1/100}$.

3.2.1 Trazado de ruta

Se ha seleccionado una ruta Manta – “Caladero” – Manta, en el océano Pacífico descrito por nodos, como se muestra en la Figura No. 28. La duración del trayecto completo se calculó en 1218 millas náuticas con una velocidad de servicio promedio de 10.5 nudos. Para simplificar los cálculos, se ha considerado solo la condición al desplazamiento máximo, la misma que se encuentra detalla en la sección 2.2 para cada embarcación.

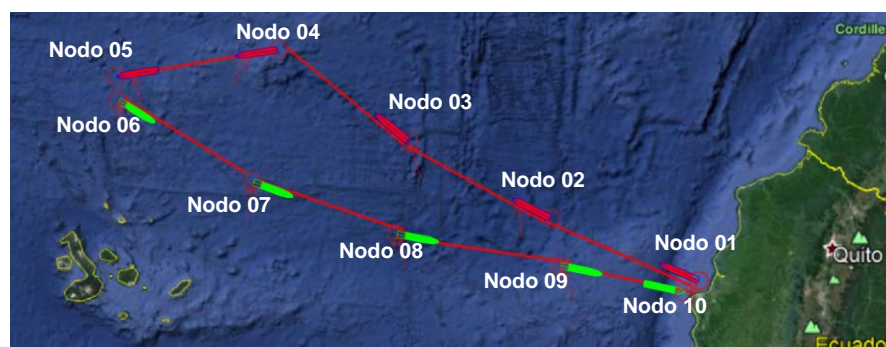


Figura No. 28 Esquema de los nodos seleccionados para el caso de estudio, Fuente: Google Earth Pro.

El estado de mar, coordenadas geográficas y batimetría en el trayecto de ida como en el de regreso se muestran en la Tabla XVI. y Tabla XVII, datos ECMWF [17].

	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5
Latitud	0°46'38.27"S	0°16'4.94"N	1°34'8.16"N	3°15'51.56"N	2°51'53.74"N
Longitud	80°47'6.91"W	83°16'38.70"W	85°34'22.78"W	87°39'24.27"W	90°36'36.76"W
Altura de Ola [m]	1.1	2.2	2.1	2.2	2.4
Periodo de Ola [1/s]	9	9	8	9	10
Angulo de encuentro [°]	81	55	32	98	86
Batimetría [m]	500	2000	2000	3000	3000

Tabla XVI. Datos meteorológicos del trayecto de ida.

	Nodo 6	Nodo 7	Nodo 8	Nodo 9	Nodo 10
Latitud	2°31'10.51"N	1° 2'46.04"N	0° 6'27.80"N	0°28'9.67"S	0°54'44.55"S
Longitud	90°25'17.07"W	88° 4'8.50"W	85°34'16.07"W	82°45'13.23"W	80°46'8.72"W
Altura de Ola [m]	2.2	1.9	2.1	1.1	0.9
Periodo de Ola [1/s]	10	10	9	6	6
Angulo de encuentro [°]	140	102	118	125	111
Batimetría [m]	3000	3000	2000	2000	500

Tabla XVII. Datos meteorológicos del trayecto de regreso.

3.2.2 Espectro DNV

Un estado de mar estacionario es caracterizado por un conjunto de parámetros ambientales: altura de ola significativa H_s , periodo de pico espectral T_p , batimetría y dirección de viento. Tomando como base los datos meteorológicos de operación, se ha usado la formulación de espectro de mar propuesta por DNV. El factor de incremento de pico, y utilizado por DNV se determina a partir de la altura significativa de la ola y el período modal [18]:

$$S_{DNV \zeta}(\omega_w) = \alpha \cdot \omega_w^{-5} \cdot \exp(-\beta \cdot \omega_w^{-4}) \cdot \gamma^{\exp\left(\frac{-1}{2 \cdot \sigma^2} \left(\frac{\omega}{\omega_p} - 1\right)^2\right)} \quad (3.4)$$

En la Tabla XVIII se muestra el resultado de la integración de la curva de espectro de ola evaluada en cada nodo, utilizando como datos de entrada los obtenidos en la sección 3.2.1.

Nodo	$m_0, S_{DNV \zeta}(\omega_W)$
01	0.076
02	0.302
03	0.275
04	0.302
05	0.361
06	0.303
07	0.226
08	0.275
09	0.075
10	0.050

Tabla XVIII. Resumen de resultados de integración de espectro de ola efectuado en cada nodo.

Una vez definido el espectro de olas, el siguiente paso ha sido definir la interacción del buque con medio, para el cual se usa el operador RAO, por sus siglas en inglés, 'Response Amplitude Operators', el operador expresa las propiedades dinámicas del buque y se obtiene de las características de movimientos multiplicadas por los valores de espectro de mar, [19].

3.2.3 Masa añadida, A_{44}

La masa añadida se calculó mediante el mapeo de Lewis [20], el mismo que permite calcular el coeficiente mediante el cálculo del coeficiente por estaciones para luego integrarlo a lo largo del casco.

	Inercia Añadida, $A_{44}, [\text{ton} \cdot \text{m}^2]$
Atunero I	2310.50
Atunero II	2516.58

Tabla XIX. Resultados de Inercia añadida de los buques en estudio, integrada a lo largo del casco.

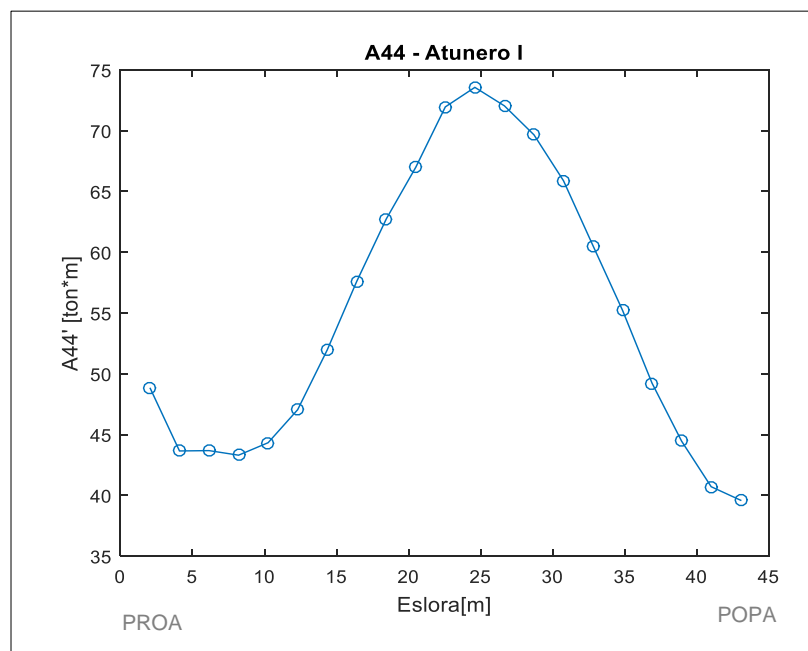


Figura No. 29. Curva de Inercia añadida del Atunero I, a lo largo de la eslora.
Fuente: Matlab 15 versión de prueba.

Los cálculos de la inercia añadida fueron realizados a través de un código desarrollado en el software MATLAB, en su versión 15 de prueba, en el anexo A se detalla el código en mención.

3.2.4 Amortiguamiento no lineal de Rolido

El amortiguamiento del roldo, B_{44e} , es esencial para describir el modo de falla de roldo paramétrico. El amortiguamiento del roldo está dominado por efectos viscosos y la velocidad del barco.

El término B_{44e} puede obtenerse usando una combinación de los componentes lineales y no lineales, usando la ecuación (3.5) propuesta por Himeno [21] y explicado en detalle por ITTC [22].

Los datos de entrada para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento de cada buque se detallan en el anexo B.

$$B_{44e} = B_{\varphi e} = B_{\varphi 1} + \frac{8}{3\pi} \omega_e \cdot \varphi_a \cdot B_{\varphi 2} \quad (3.5)$$

Donde:

$$B_{\varphi 1} = B_{sustentación} + B_{olas} \quad (3.6)$$

$$B_{\varphi 2} = B_{friccional} + B_{vórtices} + B_{quilla\ de\ balance} + B_{enquilladura} \quad (3.7)$$

El coeficiente de amortiguamiento varía para cada uno de los nodos, los resultados se presentan a continuación:

NODO	Atunero I	Atunero II
1	1284.70	1439.06
2	1284.17	1438.43
3	1283.95	1438.17
4	1285.07	1439.50
5	1284.50	1438.81
6	1285.35	1439.87
7	1284.78	1439.17
8	1285.49	1440.03
9	1288.17	1443.25
10	1287.56	1442.50

Tabla XX. Coeficiente de amortiguamiento calculado para cada nodo, en [(Ton*m²)/seg] con $F_n > 0$.

Para una consideración del caso del buque sin propulsión y gobierno, es necesario cálculos los mismos valores de $B_{\varphi 1}$ y $B_{\varphi 2}$ sin la corrección del coeficiente por velocidad, a seguir se presentan los valores obtenido para cada embarcación.

NODO	Atunero I	Atunero II
1	380.68	445.40
2	371.47	434.62
3	367.63	430.13
4	387.20	453.02
5	377.14	441.25
6	392.08	458.73

7	382.10	447.06
8	394.49	461.55
9	441.35	516.38
10	430.66	503.87

Tabla XXI. Coeficiente de amortiguamiento calculado para cada nodo, en [(Ton*m²)/seg] con Fn=0.

3.2.5 Cálculo de estabilidad en olas longitudinales

Para el cálculo de la estabilidad en olas fue seleccionado el software Maxsurf, módulo de 'Stability Advanced', por la precisión para el cálculo GM_t . La desventaja que se presenta con este software es que debe ser corrido para cada nodo de la ruta de navegación.

Dentro del proceso de cálculo ha sido necesario definir la altura de ola respecto del calado, la longitud de ola respecto de la eslora entre perpendiculares y la posición de la cresta respecto del desfase de la onda respecto del buque.

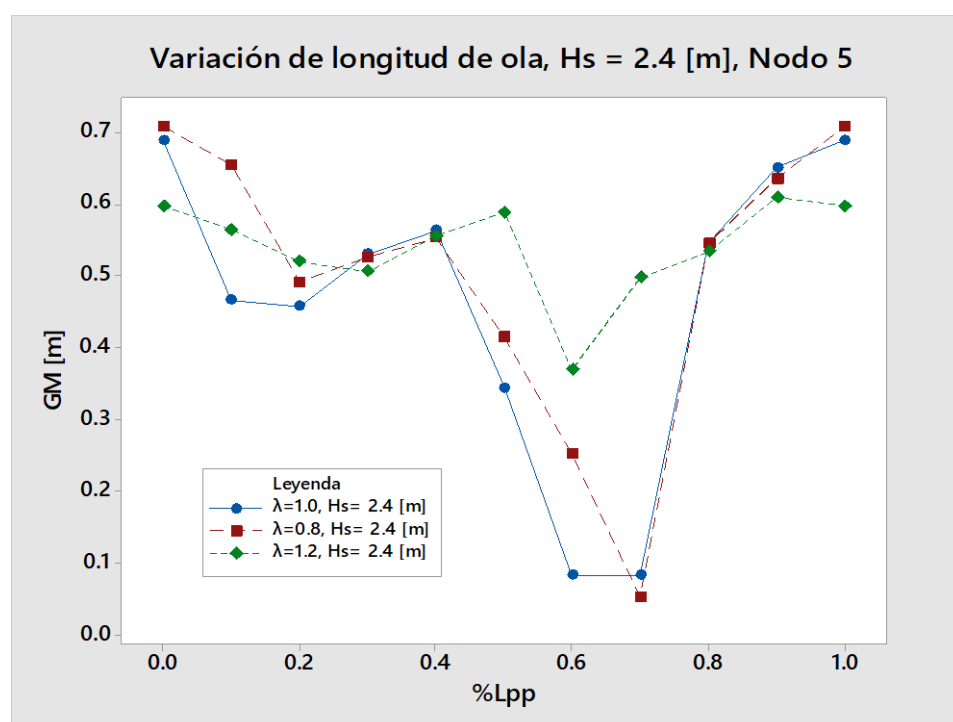


Figura No. 30. Variación de GM con ola del nodo 5, respecto de la longitud de ola, Atunero I. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

En la Figura No. 30 se presenta el cálculo de la altura metacéntrica para una altura de ola constante pero variando la longitud de ola, este proceso se realizó a lo largo del buque de proa a popa en 10 posiciones, mínimo sugerido por la OMI [10].

3.2.6 Modos de falla del rolido paramétrico

3.2.6.1 Criterio 1: Posibles coincidencias, [13]

El criterio propone que, si se cumple que el período natural de rolido es igual o aproximadamente el doble del período de encuentro entre la ola y el buque, este es susceptible al rolido paramétrico, ecuación (3.8).

$$T_{\varphi} \cong \frac{2}{n} * T_e \quad (3.8)$$

Mientras que la longitud de ola debe encontrarse en intervalo de 0.8 y 1.2 de la eslora entre perpendiculares del buque, para que el modo de falla se presente.

Utilizando la longitud de ola en cada uno de los nodos, en ningún caso se detecta coincidencia por longitud. Sin embargo, el criterio si detecta coincidencia en el periodo natural de rolido. Los resultados respecto de los periodos calculados en cada unos de los nodos se presentan en la Tabla XXII y Tabla XXIII:

		Te [seg]	T φ [seg]	Crit.
1	<i>H_{prom}</i>	9.58	8.667	E
	<i>H1/3</i>	9.58	8.70	E
	<i>H1/10</i>	9.58	8.70	E
	<i>H1/100</i>	9.58	11.467	E
2	<i>H_{prom}</i>	11.54	8.700	E
	<i>H1/3</i>	11.54	14.59	E
	<i>H1/10</i>	11.54	22.11	E
	<i>H1/100</i>	11.54	Indeterminado	I

3	<i>Hprom</i>	12.63	8.700	E
	<i>H1/3</i>	12.63	13.79	E
	<i>H1/10</i>	12.63	19.32	E
	<i>H1/100</i>	12.63	Indeterminado	I
4	<i>Hprom</i>	8.25	8.700	E
	<i>H1/3</i>	8.25	14.59	E
	<i>H1/10</i>	8.25	22.11	I
	<i>H1/100</i>	8.25	Indeterminado	I
5	<i>Hprom</i>	10.25	8.700	E
	<i>H1/3</i>	10.25	16.30	E
	<i>H1/10</i>	10.25	39.790	I
	<i>H1/100</i>	10.25	Indeterminado	I
6	<i>Hprom</i>	7.91	8.700	E
	<i>H1/3</i>	7.91	16.30	I
	<i>H1/10</i>	7.91	39.79	I
	<i>H1/100</i>	7.91	Indeterminado	I
7	<i>Hprom</i>	9.33	8.700	E
	<i>H1/3</i>	9.33	12.34	E
	<i>H1/10</i>	9.33	16.47	E
	<i>H1/100</i>	9.33	88.974	I
8	<i>Hprom</i>	7.63	8.700	E
	<i>H1/3</i>	7.63	13.79	I
	<i>H1/10</i>	7.63	19.32	I
	<i>H1/100</i>	7.63	Indeterminado	I
9	<i>Hprom</i>	4.51	8.667	E
	<i>H1/3</i>	4.51	8.70	E
	<i>H1/10</i>	4.61	8.70	E
	<i>H1/100</i>	4.51	11.467	E
10	<i>Hprom</i>	4.97	8.642	E
	<i>H1/3</i>	4.97	8.68	E
	<i>H1/10</i>	4.97	8.70	E

	<i>H1/100</i>	4.97	8.700	E
--	---------------	------	-------	---

Tabla XXII. Resultado de Criterio de coincidencias de Periodos de Rolido, Atunero I.

		Te [seg]	T ϕ [seg]	Crit.
1	<i>Hprom</i>	9.60	7.988	E
	<i>H1/3</i>	9.60	8.02	E
	<i>H1/10</i>	9.60	8.23	E
	<i>H1/100</i>	9.60	10.383	E
2	<i>Hprom</i>	11.70	8.027	E
	<i>H1/3</i>	11.70	11.27	E
	<i>H1/10</i>	11.70	15.15	E
	<i>H1/100</i>	11.70	18.236	E
3	<i>Hprom</i>	12.98	8.027	E
	<i>H1/3</i>	12.98	11.09	E
	<i>H1/10</i>	12.98	14.52	E
	<i>H1/100</i>	12.98	20.218	E
4	<i>Hprom</i>	8.52	8.027	E
	<i>H1/3</i>	8.52	11.27	E
	<i>H1/10</i>	8.52	15.15	E
	<i>H1/100</i>	8.52	18.236	I
5	<i>Hprom</i>	10.26	9.196	E
	<i>H1/3</i>	10.26	12.48	E
	<i>H1/10</i>	10.26	17.374	E
	<i>H1/100</i>	10.26	22.874	I
6	<i>Hprom</i>	7.83	8.027	E
	<i>H1/3</i>	7.83	11.27	E
	<i>H1/10</i>	7.83	15.15	I
	<i>H1/100</i>	7.83	18.236	I
7	<i>Hprom</i>	9.30	8.021	E
	<i>H1/3</i>	9.30	10.56	E
	<i>H1/10</i>	9.30	12.60	E
	<i>H1/100</i>	9.30	18.236	I

8	<i>Hprom</i>	7.57	8.027	E
	<i>H1/3</i>	7.57	11.09	E
	<i>H1/10</i>	7.57	14.52	I
	<i>H1/100</i>	7.57	20.218	I
9	<i>Hprom</i>	4.46	7.988	E
	<i>H1/3</i>	4.46	8.02	E
	<i>H1/10</i>	4.46	8.23	E
	<i>H1/100</i>	4.46	10.383	I
10	<i>Hprom</i>	4.93	7.968	E
	<i>H1/3</i>	4.93	8.01	E
	<i>H1/10</i>	4.93	8.02	E
	<i>H1/100</i>	4.93	9.196	E

Tabla XXIII. Resultado de Criterio de coincidencias de Periodos de Rolido, Atunero II.

3.2.6.2 Criterio 2: Zonas de inestabilidad de Mathieu (p y q – amortiguado)

Como segundo criterio de riesgo se propone evaluar los parámetros adimensionales p y q en el grafico “Ince–Strutt” propuesto por Mathieu, [4]. Los parámetros p y q son parte de la ecuación de Mathieu, definidos en la ecuación (3.9), como:

$$\frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} + \mu \frac{d\varphi}{d\tau} + (p + q \cdot \cos(\tau)) \cdot \varphi = 0 \quad (3.9)$$

$$p = \left(\frac{\omega_m}{\omega_e} \right)^2 - \mu^2 \quad q = \left(\frac{\omega_a}{\omega_e} \right)^2 \quad (3.10)$$

$$\omega_m = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM_m}{I_x + A_{44}}} \quad \omega_a = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM_a}{I_x + A_{44}}} \quad \mu = \frac{B_{44e}}{(I_{xx} + A_{44}) \cdot \omega_e} \quad (3.11)$$

$$GM_m = 0.5 \cdot (GM_{\max} + GM_{\min}) \quad (3.12)$$

$$GM_a = 0.5 \cdot (GM_{\max} - GM_{\min})$$

El criterio se evalúa graficando cada uno de los nodos con sus respectivas alturas de ola significativas a la gráfica p y q, considerando la influencia del amortiguamiento [23] y [24], a continuación me indica una sección de cálculos para el nodo 4, tabla XXIII, y su respectiva gráfica, Figura No. 31

	$\varphi [^\circ]$	P_e	H_ω [m]	KG <i>fluido</i> [m]	GM_a [m]	GM_m [m]	ω_m [$\frac{rad}{s}$]	ω_a [$\frac{rad}{s}$]	$\hat{\omega}_m$	$\hat{\omega}_a$	p	q
prom.	4.62	0.45	1.37	3.54	0.02	0.55	0.64	0.13	0.88	0.18	0.76	0.03
1/3	7.38	0.14	2.19	3.54	0.21	0.40	0.55	0.40	0.75	0.55	0.55	0.3
1/10	9.37	0.04	2.80	3.54	0.29	0.37	0.53	0.47	0.72	0.64	0.51	0.40
1/100	12.31	0.00	3.67	3.54	0.33	0.27	0.45	0.50	0.62	0.68	0.37	0.46

Tabla XXIV. Desagregación del cálculo de los parámetros p y q para el nodo 4, $\mu = 0.084$, en color azul un punto dentro del rango inestable, Atunero I

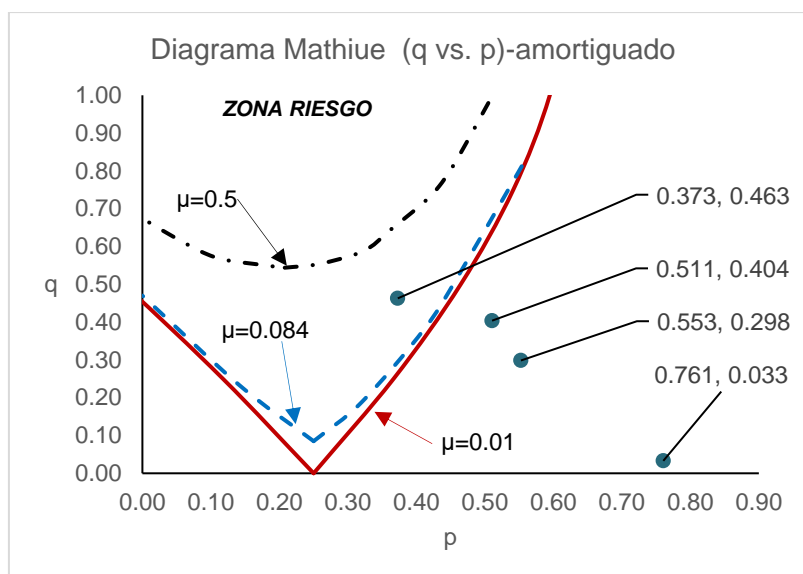


Figura No. 31. Diagrama Ince-Strutt-amortiguado con los resultados en el nodo 4. Atunero I.

De cada nodo se evalúa la respuesta del criterio a su altura significativa, obteniendo como resultado:

Nodo	Hs[m]	p	q	Criterio
1	1.1	0.94	0.03	E
2	2.2	1.00	0.54	E
3	2.1	1.23	0.61	E
4	2.2	0.55	0.29	E
5	2.4	0.77	0.47	E
6	2.2	0.47	0.25	I
7	1.9	0.70	0.27	E
8	2.1	0.44	0.22	I
9	1.1	0.21	0.008	E
10	0.9	0.26	0.008	E

Tabla XXV. Resultados del segundo criterio de Rolido Paramétrico para la altura significativa de cada nodo, Atunero I.

Nodo	Hs[m]	p	q	Criterio
1	1.1	1.38	0.06	E
2	2.2	1.70	0.55	E
3	2.1	0.73	0.65	E
4	2.2	1.02	0.29	E
5	2.4	0.61	0.5	E
6	2.2	0.89	0.24	E
7	1.9	0.58	0.29	E
8	2.1	0.25	0.19	E
9	1.1	0.25	0.01	E
10	0.9	0.30	0.01	E

Tabla XXVI. Resultados del segundo criterio de Rolido Paramétrico para la altura significativa de cada nodo, Atunero II.

3.2.6.3 Criterio 3: Altura crítica de Dunwoody

En este criterio se evaluará “el nivel crítico de altura de la ola” siguiendo el procedimiento de Dunwoody [9]. El criterio propone que las fluctuaciones de GMt pueden ser expresadas en función de la densidad espectral, $S_{e\xi}$, de la frecuencia de encuentro, ω_e , y la respuesta de adrizamiento (GM_a/ζ_a).

De la fórmula de espectro de respuesta se obtiene la altura crítica de ola, ζ_a , ecuación (3.13), cumpliendo la condición de reducción del amortiguamiento adimensional, ecuación (3.14).

$$S_{GMt} = \left(\frac{GM_a}{\zeta_a} \right)^2 \cdot S_{e\xi}(\omega_\phi) \Rightarrow \zeta_a = GM_a \cdot \left(\frac{S_{GMt}}{S_{e\xi}(\omega_\phi)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

$$\frac{B_{total}}{B_{crit}} - \Delta\xi \leq 0 \quad (3.14)$$

$$\Delta\xi = \frac{\pi \cdot g^2 \cdot S_{GMt}}{4 \cdot \omega_\phi^3 \cdot k_{xx}^4} \quad (3.15)$$

Donde: B_{total} es el coeficiente de amortiguamiento equivalente, B_{crit} , el coeficiente de amortiguamiento crítico ecuación (3.15), ω_ϕ es la frecuencia natural de rolo del buque, k_{xx} es el radio de giro virtual.

$$B_{crit} = 2 \cdot \sqrt{(A_{xx} + I_{xx}) \cdot \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM} \quad (3.16)$$

NODO	Hs[m]	Ψ [deg]	GM _a [m]	B _{44e} , FN=0 [ton*m ² /seg]	H _{crit} [m]	Criterio
1	1.10	81	0.54	380.68	2.52	E
2	2.20	55	0.40	371.47	3.23	E
3	2.10	32	0.41	367.63	4.21	E
4	2.20	98	0.40	387.20	2.22	E
5	2.40	86	0.39	377.14	2.44	E
6	2.20	140	0.40	392.08	1.84	I
7	1.90	102	0.43	382.10	2.19	E
8	2.10	118	0.41	394.49	1.98	I
9	1.10	125	0.54	441.35	1.82	E
10	0.90	111	0.54	430.66	1.96	E

Tabla XXVII. Resultados de criterio Dunwoody, Atunero I.

NODO	H _s [m]	Ψ [deg]	GM _a [m]	B _{44e} , FN=0 [ton*m ² /seg]	H _{crit} [m]	Criterio
1	1.10	81	0.647	445.40	2.95	E
2	2.20	55	0.515	434.62	3.16	E
3	2.10	32	0.516	430.13	4.53	E
4	2.20	98	0.515	453.02	2.24	E
5	2.40	86	0.494	441.25	2.27	E
6	2.20	140	0.515	458.73	2.26	E
7	1.90	102	0.525	447.06	2.04	E
8	2.10	118	0.516	461.55	2.18	E
9	1.10	125	0.647	516.38	2.07	E
10	0.90	111	0.646	503.87	2.24	E

Tabla XXVIII. Resultados de criterio Dunwoody, Atunero II.

3.2.7 Primer nivel de vulnerabilidad – OMI [25]

La comprobación del primer nivel de vulnerabilidad para el modo de falla de rolido paramétrico se basa en condición de frecuencia y la magnitud de las variaciones de estabilidad.

La condición de frecuencia, en sector lineal de la primera zona de inestabilidad del diagrama p y q, con las transformaciones adecuadas puede ser representado mediante un rango que velocidades [4], delimitado por los siguientes valores:

$$V_{S1} = \frac{\sqrt{g} L}{0.5144} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} - \frac{\sqrt{2L}}{T_{\varphi}\sqrt{g}} \right) \quad (3.17)$$

$$V_{S2} = \frac{\sqrt{g} L}{0.5144} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} - \frac{\sqrt{6L}}{T_{\varphi}\sqrt{g}} \right) \quad (3.18)$$

El variable, T_{φ} , ecuación (3.17) corresponde a los valores de frecuencia natural del buque en olas. Cuando el valor mínimo de GM es negativo, es considerado inestable, ya que es valor de periodo sería lo bastante grande, y por tanto ingresa a la zona de inestabilidad.

$$T_{\varphi} = \frac{c * B}{\sqrt{GM_{0las}}} \quad (3. 19)$$

		T φ [seg]	V _{S1} [Nudos]	V _{S2} [Nudos]	Crit.
1	Hprom	8.667	2.86	-6.07	E
	H1/3	8.70	2.91	-5.99	E
	H1/10	8.70	2.91	-5.99	E
	H1/100	11.467	5.84	-0.91	E
2	Hprom	8.700	2.91	-5.99	E
	H1/3	14.59	7.82	2.51	E
	H1/10	22.11	10.28	6.78	E
	H1/100	Indeterminado			I
3	Hprom	8.700	2.91	-5.99	E
	H1/3	13.79	7.40	1.79	E
	H1/10	19.32	9.59	5.59	E
	H1/100	Indeterminado			I
4	Hprom	8.700	2.91	-5.99	E
	H1/3	14.59	7.82	2.51	E
	H1/10	22.11	10.28	6.78	I
	H1/100	Indeterminado			I
5	Hprom	8.700	2.91	-5.99	E
	H1/3	16.30	8.58	3.83	E
	H1/10	39.790	12.41	10.46	I
	H1/100	Indeterminado			I
6	Hprom	8.700	2.91	-5.99	E
	H1/3	16.30	8.58	3.83	E
	H1/10	39.79	12.41	10.46	I
	H1/100	Indeterminado			I
7	Hprom	8.700	2.91	-5.99	E
	H1/3	12.34	6.49	0.22	E
	H1/10	16.47	8.64	3.94	E
	H1/100	88.974	13.88	13.01	I
8	Hprom	8.700	2.91	-5.99	E
	H1/3	13.79	7.40	1.79	E
	H1/10	19.32	9.59	5.59	E
	H1/100	Indeterminado			I
9	Hprom	8.667	2.86	-6.07	E

	H1/3	8.70	2.91	-5.99	E
	H1/10	8.70	2.91	-5.99	E
	H1/100	11.467	5.84	-0.91	E
10	Hprom	8.642	2.83	-6.13	E
	H1/3	8.68	2.88	-6.03	E
	H1/10	8.70	2.91	-5.99	E
	H1/100	8.700	2.91	-5.99	E

Tabla XXIX. Criterios de frecuencia, Nivel I modo de falla Rolido Paramétrico, Atunero I.

		T ϕ [seg]	VS1 [Nudos]	VS2 [Nudos]	Crit.
1	Hprom	9.60	1.17	-9.59	E
	H1/3	9.60	1.23	-9.49	E
	H1/10	9.60	1.60	-8.86	E
	H1/100	9.60	4.56	-3.72	E
2	Hprom	11.70	1.24	-9.47	E
	H1/3	11.70	5.45	-2.18	E
	H1/10	11.70	8.12	2.45	E
	H1/100	11.70	9.44	4.72	E
3	Hprom	12.98	1.24	-9.47	E
	H1/3	12.98	5.29	-2.47	E
	H1/10	12.98	7.79	1.87	E
	H1/100	12.98	10.07	5.81	E
4	Hprom	8.52	1.24	-9.47	E
	H1/3	8.52	5.45	-2.18	E
	H1/10	8.52	8.12	2.45	E
	H1/100	8.52	9.44	4.72	I
5	Hprom	10.26	3.10	-6.25	E
	H1/3	10.26	6.46	-0.43	E
	H1/10	10.26	9.12	4.17	E
	H1/100	10.26	10.74	6.98	I
6	Hprom	7.83	1.24	-9.47	E
	H1/3	7.83	5.45	-2.18	E
	H1/10	7.83	8.12	2.45	E
	H1/100	7.83	9.44	4.72	I
7	Hprom	9.30	1.23	-9.49	E
	H1/3	9.30	4.75	-3.39	E
	H1/10	9.30	6.56	-0.26	E

	H1/100	9.30	9.44	4.72	I
8	Hprom	7.57	1.24	-9.47	E
	H1/3	7.57	5.29	-2.47	E
	H1/10	7.57	7.79	1.87	E
	H1/100	7.57	10.07	5.81	I
9	Hprom	4.46	1.17	-9.59	E
	H1/3	4.46	1.23	-9.49	E
	H1/10	4.46	1.60	-8.86	E
	H1/100	4.46	4.56	-3.72	I
10	Hprom	4.93	1.14	-9.66	E
	H1/3	4.93	1.21	-9.53	E
	H1/10	4.93	1.23	-9.49	E
	H1/100	4.93	3.10	-6.25	E

Tabla XXX. Criterios de frecuencia, Nivel I modo de falla Rolido Paramétrico, Atunero II.

Respecto de la magnitud de variación de la estabilidad, se considera que un buque es vulnerable si la proporción entre la amplitud de la variación de la altura metacéntrica en la onda ΔGM en olas no es mayor a la relación:

$$\frac{GM_a}{GM_m} \geq 2 \frac{\ln f + \ln 2}{\pi n} + \frac{4\delta}{\omega_m} \quad (3.20)$$

El número de ciclos se encuentra relacionado en la ecuación (3.20), dado que se puede esperar una mayor amplificación para más ciclos, como un abordaje inicial es posible utilizar $f = 5$ y $n = 4$.

Los valores obtenidos de variación de la altura metacéntrica son utilizados en todos los nodos para calcular la relación y determinar si el buque es vulnerable en el primer nivel al roldo paramétrico:

		ω_m [rad/seg]	$2 * \frac{\ln f + \ln 2}{\pi n} + \frac{4 * \delta}{\omega_m}$	GMa/ GMm	Crit.
1	Hprom	0.642	0.752	0.03	E
	H1/3	0.643	0.752	0.04	E
	H1/10	0.645	0.751	0.04	E
	H1/100	0.582	0.792	0.32	E
2	Hprom	0.644	0.751	0.04	E
	H1/3	0.550	0.816	0.53	E
	H1/10	0.529	0.834	0.78	E

	H1/100	0.453	0.913	1.22	I
3	Hprom	0.644	0.751	0.04	E
	H1/3	0.555	0.812	0.49	E
	H1/10	0.534	0.830	0.72	E
	H1/100	0.460	0.905	1.14	I
4	Hprom	0.644	0.751	0.04	E
	H1/3	0.550	0.817	0.53	E
	H1/10	0.529	0.835	0.78	E
	H1/100	0.453	0.913	1.22	I
5	Hprom	0.646	0.750	0.05	E
	H1/3	0.542	0.824	0.61	E
	H1/10	0.486	0.876	0.92	I
	H1/100	0.442	0.926	1.36	I
6	Hprom	0.644	0.751	0.04	E
	H1/3	0.550	0.817	0.53	E
	H1/10	0.529	0.835	0.78	E
	H1/100	0.453	0.913	1.22	I
7	Hprom	0.643	0.752	0.04	E
	H1/3	0.569	0.802	0.39	E
	H1/10	0.542	0.824	0.62	E
	H1/100	0.478	0.885	0.98	I
8	Hprom	0.644	0.751	0.04	E
	H1/3	0.555	0.813	0.49	E
	H1/10	0.534	0.830	0.72	E
	H1/100	0.460	0.905	1.14	I
9	Hprom	0.642	0.754	0.03	E
	H1/3	0.643	0.753	0.04	E
	H1/10	0.645	0.752	0.04	E
	H1/100	0.582	0.793	0.32	E
10	Hprom	0.642	0.753	0.02	E
	H1/3	0.642	0.753	0.03	E
	H1/10	0.643	0.753	0.04	E
	H1/100	0.646	0.751	0.05	E

Tabla XXXI. Criterios de magnitud de variación de GM, Nivel I modo de falla Rolido Paramétrico, Atunero I.

		ω_m [rad/seg]	$2 * \frac{\ln f + \ln 2}{\pi n} + \frac{4 * \delta}{\omega_m}$	GMa/ GMm	Crit.
1	Hprom	0.708	0.690	0.040	E
	H1/3	0.711	0.688	0.057	E
	H1/10	0.699	0.694	0.072	E
	H1/100	0.643	0.722	0.311	E
2	Hprom	0.709	0.689	0.053	E
	H1/3	0.634	0.727	0.399	E
	H1/10	0.604	0.745	0.633	E
	H1/100	0.546	0.785	0.690	E
3	Hprom	0.713	0.687	0.064	E
	H1/3	0.635	0.727	0.381	E
	H1/10	0.608	0.743	0.606	E
	H1/100	0.536	0.793	0.738	E
4	Hprom	0.709	0.689	0.053	E
	H1/3	0.634	0.727	0.399	E
	H1/10	0.604	0.745	0.633	E
	H1/100	0.546	0.786	0.690	E
5	Hprom	0.667	0.709	0.184	E
	H1/3	0.621	0.735	0.489	E
	H1/10	0.553	0.780	0.668	E
	H1/100	0.536	0.793	0.796	I
6	Hprom	0.709	0.689	0.053	E
	H1/3	0.634	0.727	0.399	E
	H1/10	0.604	0.745	0.633	E
	H1/100	0.546	0.786	0.690	E
7	Hprom	0.712	0.688	0.059	E
	H1/3	0.640	0.724	0.329	E
	H1/10	0.620	0.735	0.497	E
	H1/100	0.543	0.788	0.687	E
8	Hprom	0.713	0.687	0.064	E
	H1/3	0.635	0.727	0.381	E
	H1/10	0.608	0.743	0.606	E
	H1/100	0.536	0.794	0.738	E
9	Hprom	0.708	0.691	0.040	E
	H1/3	0.711	0.689	0.057	E
	H1/10	0.699	0.695	0.072	E
	H1/100	0.643	0.723	0.311	E
10	Hprom	0.707	0.691	0.032	E

	H1/3	0.711	0.689	0.053	E
	H1/10	0.712	0.689	0.058	E
	H1/100	0.667	0.710	0.184	E

Tabla XXXII. Criterios de magnitud de variación de GM, Nivel I modo de falla Rolido Paramétrico, Atunero II.

3.3 Perdida de Estabilidad

Modo de falla estrechamente relacionado al Roldo Paramétrico, siendo en ocasiones que ambos fenómenos se presentan previo a la zozobra. La Perdida de Estabilidad está asociada con el tiempo durante el cual el buque permanece en la cresta de la ola. La curva de brazos adrizantes y la altura metacéntrica variará dependiendo de la posición de la ola respecto del buque. En general el modo de falla puede presentarse cuando la celeridad de ola es cercana a la velocidad de servicio del buque [10].

Este modo de falla no es un problema en caso de barcos de baja velocidad, por lo tanto, el analisis detallado solo es necesario para un número de Froude superior a 0.24, en el caso de los dos atuneros este parámetro se encuentra en 0.257, por lo que se procede a revisar los criterios de vulnerabilidad.

3.3.1 Primer nivel de vulnerabilidad – OMI

El primer nivel de vulnerabilidad considera la magnitud del cambio de la estabilidad transversal cuando una gran ola cruza a lo largo de la embarcación. Para la ponderación de esta magnitud en el cambio de la estabilidad, en cada caso es necesario calcular el tiempo promedio en que cual el buque se encuentra navegando sobre la cresta, ecuación (3.21) [4]:

$$tbc = \frac{x_2 - x_1}{c - V_s} \quad (3.21)$$

Donde la variable c , corresponde a la celeridad de la ola y V_s , la velocidad de servicio del buque, en [m/seg]. Los valores x_2 y x_1 corresponden a la longitud donde la variación de GM en olas se encuentra por debajo del nivel crítico, indicado en el código IS 2008 [1], 0.15 [m].

Un ejemplo de cómo fue evaluado la distancia entre x_2 y x_1 para un caso, se presenta en la Figura No. 32:

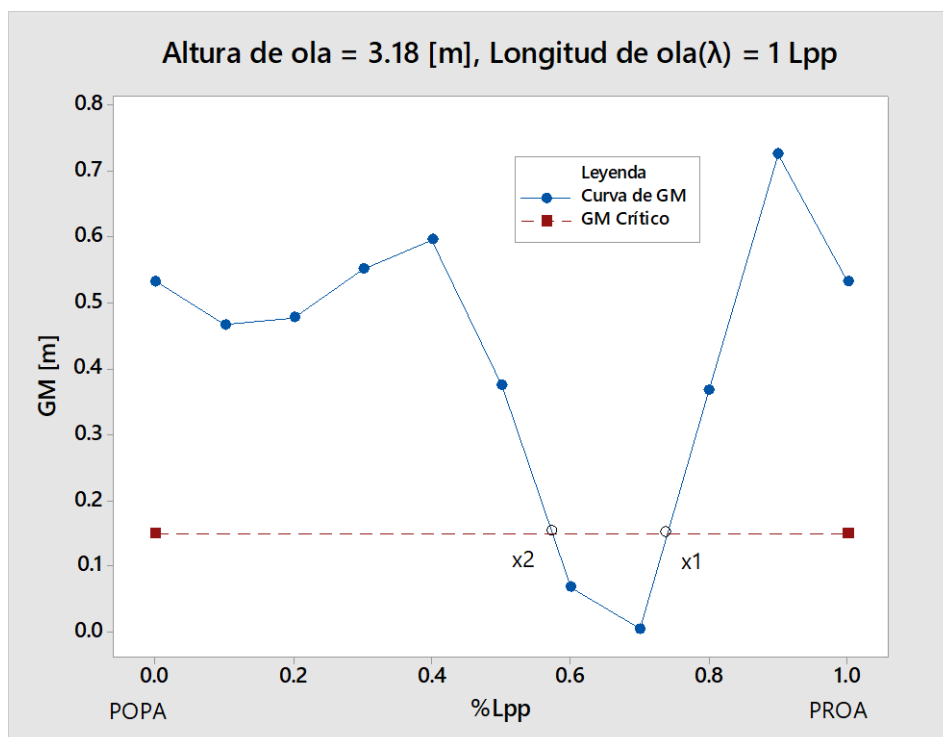


Figura No. 32. Ejemplo de cálculo de la distancia x_1 y x_2 de la curva de variación de GM, en el primer nivel de vulnerabilidad de pérdida de estabilidad, Atunero I. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Una vez calculados los tiempos 'tbc' para cada uno de los nodos (sub-i) y sus alturas significativas (sub-j), ecuación (3.22), se procede a calcular la función de ponderación W_{ij} .

$$m(tbc) = \sum_i \sum_j tbc_{ij} W_{ij} \quad (3.22)$$

La función de probabilidad W_{ij} , son valores de ponderación sugeridos en el documento de IMO-SDC 2 WP4 del 2015 [25], y que sigue una tendencia polinómica descrita en la ecuación (3.23):

$$W_{ij} = -0.0046 * H_{\omega}^6 + 0.0609 * H_{\omega}^5 - 0.2827 * H_{\omega}^4 + 0.5174 * H_{\omega}^3 - 0.2584 * H_{\omega}^2 - 0.0116 * H_{\omega} + 0.0198 \quad (3.23)$$

Donde H_{ω} , corresponde a un conjunto de variaciones de altura de ola, dentro de un determinado intervalo, las cuales forman una curva de tendencia polinómica,

ecuación (3.23), y a través de esta curva obtener el valor de probabilidad respectivo para cada gama altura en cada uno de los nodos.

Finalmente, el tiempo promedio en cual el buque pasa por la ola se divide entre el periodo natural de rolo, ecuación (3.24), el valor crítico no debe sobrepasar el valor de 1, dado que si esto ocurre se considera vulnerable.

$$Cr_1 = \frac{m(tbc)}{T_\varphi} \quad (3.24)$$

A continuación se presentan los nodos en los cuales el Atunero I (Tabla XXXIII) y Atunero II (Tabla XXXIV) donde las curvas de variación de GM sobrepasan el nivel crítico a 0.15 [m] y sus respectivo calculo del criterio Cr_1 .

	H_ω	Celeridad $_\omega$ [m/seg]	%Lpp - x_1	%Lpp - x_2	tbc [seg]	W_i	m(tbc)
1	0.69	7.23	0.00	0.00	0.00	0.004	0.00
	1.10		0.00	0.00	0.00	0.059	0.00
	1.40		0.00	0.00	0.00	0.129	0.00
	1.84		0.00	0.00	0.00	0.212	0.00
2	1.37	7.23	0.00	0.00	0.00	0.118	0.000
	2.20		0.00	0.00	0.00	0.247	0.000
	2.80		0.59	0.73	2.95	0.207	0.61
	3.67		0.57	0.75	3.79	0.094	0.355
3	1.31	6.43	0.00	0.00	0.00	0.104	0.000
	2.10		0.00	0.00	0.00	0.242	0.000
	2.68		0.60	0.73	4.89	0.224	1.096
	3.50		0.57	0.75	6.76	0.104	0.704
4	1.37	7.23	0.00	0.00	0.00	0.118	0.000
	2.20		0.00	0.00	0.00	0.247	0.000
	2.80		0.59	0.73	2.95	0.207	0.610
	3.67		0.57	0.75	3.79	0.094	0.355
5	1.50	8.03	0.00	0.00	0.00	0.146	0.000
	2.40		0.62	0.72	1.46	0.247	0.361
	3.06		0.57	0.74	2.49	0.165	0.411
	4.01		0.56	0.75	2.78	0.102	0.284
6	1.38	8.03	0.00	0.00	0.00	0.118	0.000
	2.20		0.00	0.00	0.00	0.248	0.000

	2.81		0.59	0.73	2.05	0.206	0.423
	3.68		0.57	0.75	2.63	0.093	0.246
7	1.19	8.03	0.00	0.00	0.00	0.077	0.000
	1.90		0.00	0.00	0.00	0.221	0.000
	2.42		0.615	0.72	1.54	0.246	0.378
	3.18		0.575	0.74	2.41	0.147	0.358
8	1.31	7.23	0.00	0.00	0.00	0.104	0.000
	2.10		0.00	0.00	0.00	0.242	0.000
	2.68		0.6	0.73	2.74	0.224	0.726
	3.51		0.57	0.75	3.79	0.104	0.466
9	0.69	4.82	0.00	0.00	0.00	0.003	0.00
	1.10		0.00	0.00	0.00	0.059	0.00
	1.40		0.00	0.00	0.00	0.124	0.00
	1.83		0.00	0.00	0.00	0.211	0.00
10	0.56	4.82	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00
	0.90		0.00	0.00	0.00	0.025	0.00
	1.15		0.00	0.00	0.00	0.068	0.00
	1.50		0.00	0.00	0.00	0.146	0.00
Sumatoria							7.196
T_{ϕ} [seg]							8.60
Criterio Cr1							0.837
Resultado del Criterio							E

Tabla XXXIII. Cálculo del criterio Cr1, para evaluar el primer nivel de vulnerabilidad de pérdida de estabilidad, con velocidad de servicio 10.50, Atunero I, Lpp=38.48 [m].

Es importante mencionar que para el Atunero 1, una vez finalizado el cálculo del criterio CR1, en caso del Atunero I el criterio tiene un valor de 0.837 cuando se considera una velocidad de servicio de 10.5 nudos y el periodo natural de rolo 8.60 [seg]. Pero en el caso de que considere una velocidad de servicio de 11.05 nudos, el criterio falla, obtiene un valor de CR1 superior a la unidad. Tal como se muestra en la Tabla XXXIV:

	H_{ω}	<i>Celeridad</i> _{ω} [m/seg]	%Lpp - x_1	%Lpp - x_2	tbc [seg]	W_i	m(tbc)
1	0.69	7.23	0.00	0.00	0.00	0.004	0.00
	1.10		0.00	0.00	0.00	0.059	0.00

	1.40		0.00	0.00	0.00	0.129	0.00
	1.84		0.00	0.00	0.00	0.212	0.00
2	1.37	7.23	0.00	0.00	0.00	0.118	0.000
	2.20		0.00	0.00	0.00	0.247	0.000
	2.80		0.59	0.73	3.49	0.207	0.722
	3.67		0.57	0.75	4.49	0.094	0.420
3	1.31	6.43	0.00	0.00	0.00	0.104	0.000
	2.10		0.00	0.00	0.00	0.242	0.000
	2.68		0.60	0.73	6.75	0.224	1.514
	3.50		0.57	0.75	3.49	0.104	0.973
4	1.37	7.23	0.00	0.00	0.00	0.118	0.000
	2.20		0.00	0.00	0.00	0.247	0.000
	2.80		0.59	0.73	3.49	0.207	0.722
	3.67		0.57	0.75	4.49	0.094	0.420
5	1.50	8.03	0.00	0.00	0.00	0.146	0.000
	2.40		0.62	0.72	1.64	0.247	0.405
	3.06		0.57	0.74	2.79	0.165	0.461
	4.01		0.56	0.75	3.11	0.102	0.319
6	1.38	8.03	0.00	0.00	0.00	0.118	0.000
	2.20		0.00	0.00	0.00	0.248	0.000
	2.81		0.59	0.73	2.30	0.206	0.474
	3.68		0.57	0.75	2.95	0.093	0.276
7	1.19	8.03	0.00	0.00	0.00	0.077	0.000
	1.90		0.00	0.00	0.00	0.221	0.000
	2.42		0.615	0.72	1.72	0.246	0.423
	3.18		0.575	0.74	2.70	0.147	0.397
8	1.31	7.23	0.00	0.00	0.00	0.104	0.000
	2.10		0.00	0.00	0.00	0.242	0.000
	2.68		0.6	0.73	3.24	0.224	0.726
	3.51		0.57	0.75	4.49	0.104	0.466
9	0.69	4.82	0.00	0.00	0.00	0.003	0.00
	1.10		0.00	0.00	0.00	0.059	0.00
	1.40		0.00	0.00	0.00	0.124	0.00
	1.83		0.00	0.00	0.00	0.211	0.00
10	0.56	4.82	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00
	0.90		0.00	0.00	0.00	0.025	0.00
	1.15		0.00	0.00	0.00	0.068	0.00
	1.50		0.00	0.00	0.00	0.146	0.00
Sumatoria							8.718

T_{ϕ} [seg]	8.60
Criterio Cr1	1.013
Resultado del Criterio	I

Tabla XXXIV. Cálculo del criterio Cr1, para evaluar el primer nivel de vulnerabilidad del modo de falla: pérdida de estabilidad, con velocidad de servicio 11.05, Atunero I, Lpp=38.48 [m].

De igual manera se procede a calcular el criterio CR1 para el caso del Atunero II, utilizando la misma metodología en cada caso sub-i y sub-j, en la Tabla XXXV se presentan los resultados, pero omitiendo los nodos 1, 7, 8, 9, 10 dado que en este caso no existe ningún valor de GM en olas que sea inferior al crítico de 0.15 [m].

	H_{ω}	Celeridad $_{\omega}$ [m/seg]	%Lpp - x_1	%Lpp - x_2	tbc[seg]	Wi	m(tbc)
2	1.37	7.23	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00
	2.20		0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
	2.80		0.00	0.00	0.00	0.21	0.00
	3.67		0.675	0.72	1.22	0.09	0.11
3	1.31	6.43	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
	2.10		0.00	0.00	0.00	0.24	0.00
	2.68		0.00	0.00	0.00	0.22	0.00
	3.50		0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
4	1.37	7.23	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00
	2.20		0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
	2.80		0.00	0.00	0.00	0.21	0.00
	3.67		0.675	0.72	1.22	0.09	0.11
5	1.50	8.03	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00
	2.40		0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
	3.06		0.00	0.00	0.00	0.17	0.00
	4.01		0.66	0.72	1.08	0.10	0.11
6	1.38	8.03	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00
	2.20		0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
	2.81		0.00	0.00	0.00	0.21	0.00
	3.68		0.675	0.72	0.81	0.09	0.08
Sumatoria							0.415
T_{ϕ} [seg]							8.06
Total CR1							0.05
Resultado del Criterio							E

Tabla XXXV. Cálculo del criterio Cr1, para evaluar el primer nivel de vulnerabilidad de pérdida de estabilidad, Atunero II, Lpp=42.73 [m].

3.4 Surfeo y Guiñada Súbita

La guiñada súbita está precedida por un fenómeno de surfeo, donde el barco es acelerado por la ola que se aproxima desde la popa, la cresta en conjunto produce el fenómeno de surfeo [26]. Los criterios desarrollados establecen niveles de vulnerabilidad solo para el surfeo. Dentro del presente proyecto se añade a este modo de falla: el análisis del plano diametral y una propuesta de cálculo de ángulo de escora en la guiñada súbita ya que el fenómeno está muy relacionado con la maniobrabilidad de la embarcación.

3.4.1 Análisis de Plano Diametral

El área de proyección de la flotación funciona en reacción con el área del timón. En un cambio brusco de rumbo, el centro de presión debe estar entre los valores de LCF y LCG, centros longitudinales de gravedad y flotación, para que el buque pueda maniobrar correctamente.

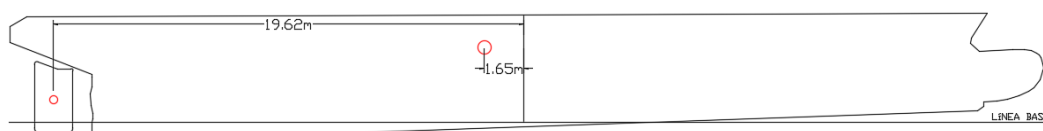


Figura No. 33. Cálculo del plano diametral del Atunero I.

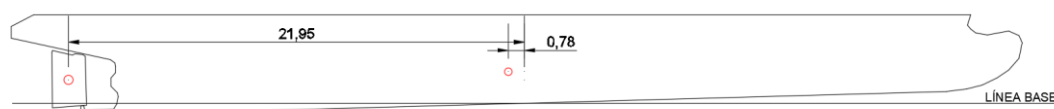


Figura No. 34. Cálculo del plano diametral del Atunero II.

	Atunero I	Atunero II
Área de la carena [m ²]	181.32	185.67
Área de timón[m ²]	4.37	4.087
Centro de presión de la combinación	-2.07	-1.24
LCB	-1.76	-1.54
LCF	-3.412	-3.334
Criterio	Cumple	Falla

Tabla XXXVI. Resultado del criterio de estabilidad del plano diametral.

3.4.2 Cálculo de escora por la guiñada súbita

La ecuación asociada con el momento de escora debido a la maniobra de giro de timón se presenta de manera generalizada en la ecuación (3.25). En la ecuación se utiliza la suposición de que el diámetro de giro es 5 veces la eslora de flotación, es decir $\alpha = 5$, de ahí se obtiene la constante 0.2 del criterio especial exigido por la OMI para buque de pasajeros, MSC.137(76) [27].

Dado que en caso de presentarse el modo de falla: guiñada súbita, el diámetro del buque en este caso en particular donde se espera que el radio de giro por evolución sea cercano a la eslora en flotación, es decir $\alpha = 1$. Con esta suposición se realizan los cálculos a seguir.

$$M_R = \frac{R}{\alpha * L_{WL}} * \frac{v_o(c)^2}{L_{WL}} * \Delta * \left(KG - \frac{d}{2} \right) [\text{kNm}] \quad (3.25)$$

$$I_R(\varphi_R) = \frac{M_R}{\Delta * g} \cos(\varphi_R) = GZ(\varphi_R) \quad (3.26)$$

Una vez calculado el brazo del momento de escora, utilizando la ecuación (3.26) es posible calcular el ángulo de escora esperado en la guiñada súbita, por medio de la intersección de las curvas, por el método gráfico para cada uno nodos, como se muestra en la Figura No. 35 a manera de ejemplo.

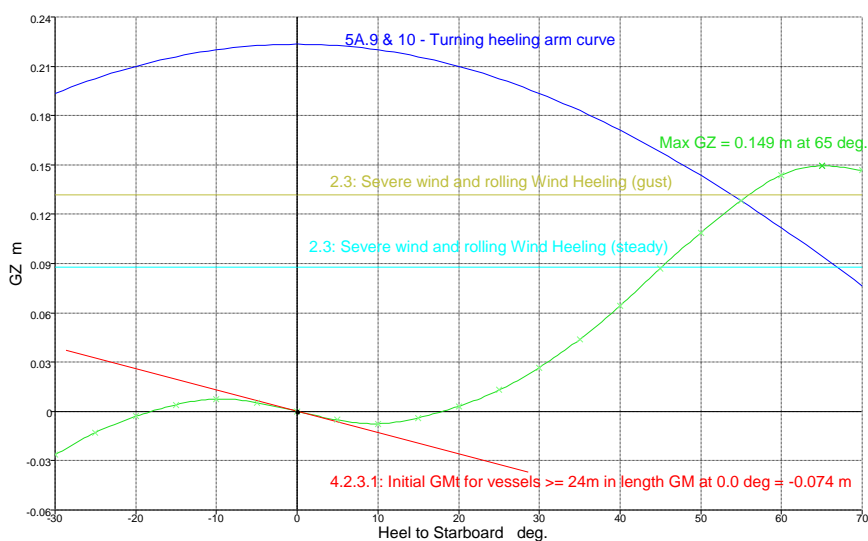


Figura No. 35 Ejemplo de intersección entre la curva de brazos adrizantes y momento producido, $H_w = 4.01$ [m], nodo 5, Atunero I. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.

En el caso de presentarse el modo de falla donde el factor $\alpha = 1$, los resultados obtenidos son los siguientes:

Nodo	H_s [m]	V_0 (c) [m/seg]	GM fluido [m]	M_r [ton - m/seg ²]	$M_r / (\Delta * g)$	Ángulo [°]
1	1.10	6.86	0.547	1388.19	0.176	26.3
2	2.20	6.84	0.496	823.33	0.105	36.5
3	2.10	5.92	0.500	630.88	0.080	28.5
4	2.20	6.84	0.496	823.33	0.105	44.0
5	2.40	7.85	0.311	1040.65	0.132	45.7
6	2.20	7.85	0.496	1084.27	0.138	44.0
7	1.90	7.86	0.508	1169.64	0.149	41.5
8	2.10	6.84	0.500	839.70	0.107	35.6
9	1.10	4.20	0.547	861.36	0.109	12.5
10	0.90	4.34	0.566	869.28	0.110	11.7

Tabla XXXVII. Cálculo de la estimación de escora en guiñada súbita después de la condición de surfeo, Atunero I.

Nodo	H _s [m]	V ₀ (c) [m/seg]	GM fluido [m]	M _r [ton - m/seg ²]	M _r /(Δ * g)	Ángulo [°]
1	1.10	6.35	0.681	1130.12	0.115	9.9
2	2.20	6.06	0.343	719.02	0.073	16.1
3	2.10	5.17	0.390	556.13	0.057	11.5
4	2.20	6.06	0.343	719.02	0.073	20.6
5	2.40	7.00	0.274	911.02	0.093	21.8
6	2.20	7.05	0.343	974.12	0.099	20.6
7	1.90	7.13	0.523	994.82	0.101	18.7
8	2.10	6.08	0.39	704.17	0.072	15.3
9	1.10	3.74	0.681	817.60	0.083	6.0
10	0.90	3.97	0.68	946.97	0.096	5.7

Tabla XXXVIII. Cálculo de la estimación de escora en guiñada súbita después de la condición de surfeo, Atunero II.

3.4.3 Criterio de área residual entre la curva GZ y brazo del momento escora producido por la guiñada brusca

Una vez calculado y graficado el brazo de momento debido a la guiñada brusca es posible introducir el concepto de área residual de la curva de brazos adrizantes.

En base a los requerimientos de estabilidad de la Autoridad marítima australiana se aplica en este caso en particular, que el Área 1 de la Figura No. 36 debe ser igual o superior al área requerida de la ecuación (3.27)

$$A_{req} = 0.2 * A_2 + 1.03 [° * m] \quad (3.27)$$

Donde el área A_2 se puede calcular como se indica en la Figura No. 37, y expresada en unidades de grados por metro.

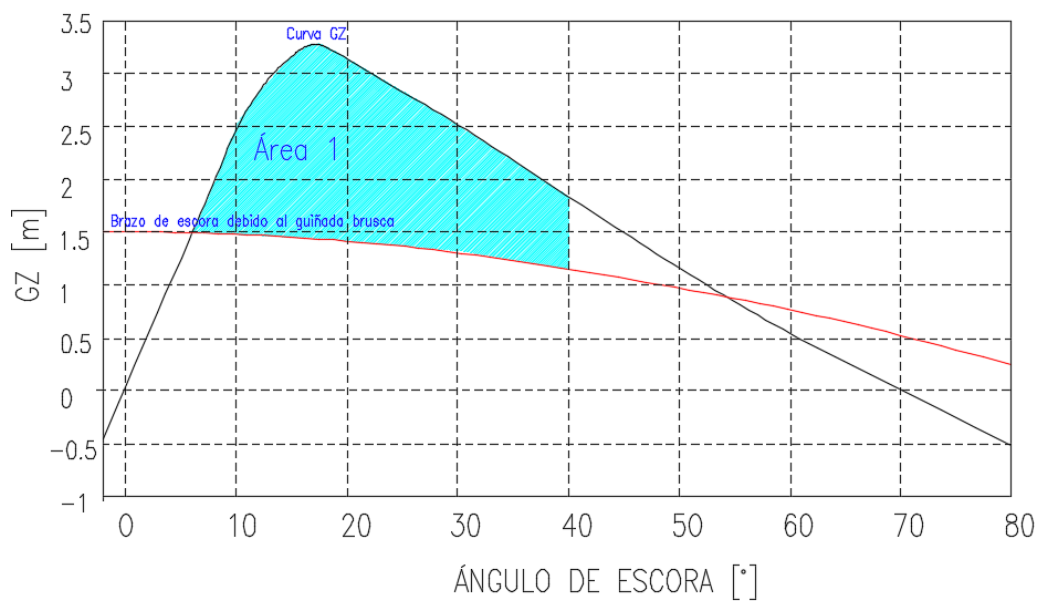


Figura No. 36 Área residual entre las curvas GZ y brazo debido a la guiñada brusca, de 0° a 40°, ejemplo de cálculo del área 1 [28].

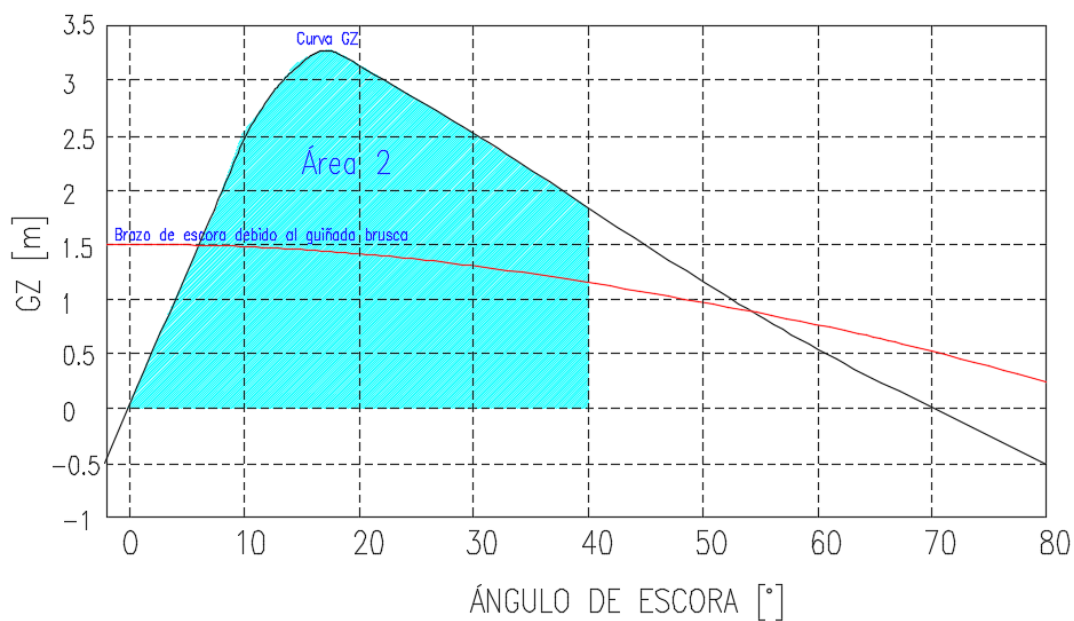


Figura No. 37 Área de la curva GZ de 0° hasta 40° de escora, ejemplo de cálculo del área 2, [28].

El cálculo del área residual se realizó para los 10 nodos de la ruta de navegación y los respectivos brazos de escora debido a la guiñada, para el proceso de cálculo y

gráficas se utilizó el programa Maxsurf Stability versión 20 - versión de prueba, variando los parámetros de la ecuación (3.28):

$$M_{turning}(\varphi) = a * \frac{V^2}{R * g} * h * \cos(\varphi)^n \quad (3.28)$$

Donde:

a , es una constante teóricamente igual a 1.

V , es la velocidad del buque en nudos.

R , es el radio de giro en guiñada, en el giro brusco igual a 1.

h , equivalente a $KG - \frac{d}{2}$, respecto a calado de la condición de carga.

n , exponente del coseno para variar la forma curva.

Una vez ingresados estos parámetros y las condiciones de mar, se realizan las iteraciones, obteniendo como resultado para cada uno de los barcos las siguientes tablas:

Nodo	H _s [m]	V [Knots]	Área 1 [m ²]	Área 2 [m ²]	Área Requerida	Intersección [°]
1	1.10	13.33	0.469	5.151	2.06	26.3
2	2.20	13.30	0.034	3.344	1.69	36.5
3	2.10	11.52	0.335	3.521	1.73	28.5
4	2.20	13.30	0.046	3.344	1.69	44.0
5	2.40	15.27	0.093	2.990	1.63	45.7
6	2.20	15.27	0.046	3.344	1.69	44.0
7	1.90	15.29	0.007	3.871	1.80	41.5
8	2.10	13.29	0.055	3.521	1.73	35.6
9	1.10	10.5	1.693	5.151	2.06	12.5
10	0.90	10.5	1.924	5.418	2.11	11.7

Tabla XXXIX. Criterio de área requerida entre las curvas de GZ y brazo debido a la guiñada brusca, Atunero I.

A manera de verificación, se presenta la gráfica de ambas curvas en el nodo 3, Atunero I:

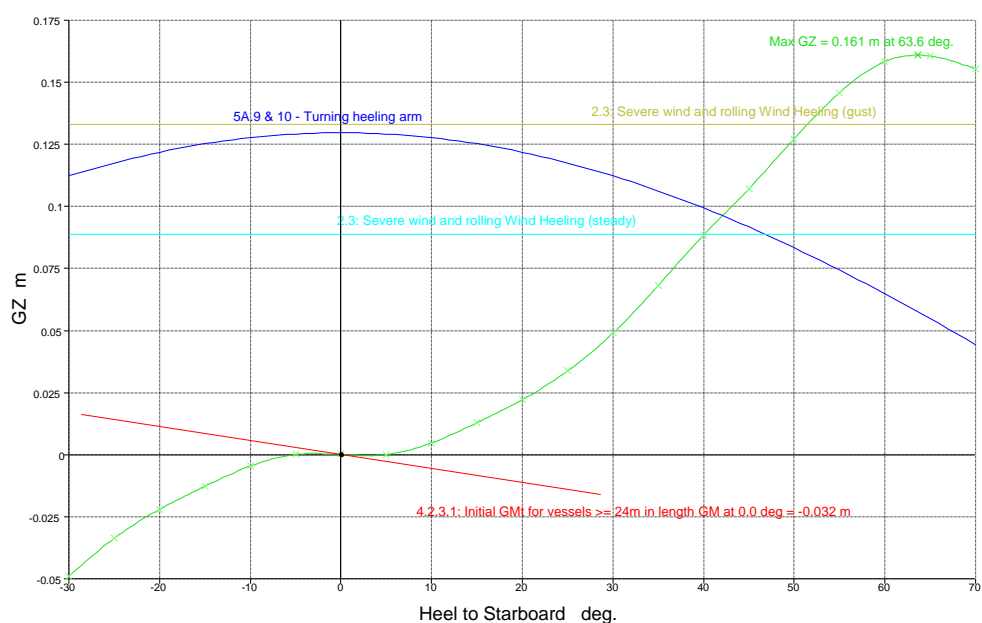


Figura No. 38 Gráfica de la curva GZ y momento debido a la guiñada brusca, nodo 3, Atunero I.

Nodo	H _s [m]	V ₀ [Knots]	Área 1 [m ²]	Área 2 [m ²]	Área Requerida	Intersección [°]
1	1.10	13.33	3.434	6.787	2.387	9.9
2	2.20	13.30	2.133	5.056	2.041	16.1
3	2.10	11.52	2.841	5.222	2.074	11.5
4	2.20	13.30	1.525	5.056	2.041	20.6
5	2.40	15.27	1.366	4.720	1.974	21.8
6	2.20	15.27	1.525	5.056	2.041	20.6
7	1.90	15.29	1.779	5.553	2.141	18.7
8	2.10	13.29	2.243	5.222	2.07	15.3
9	1.10	10.5	4.587	6.787	2.387	6.0
10	0.90	10.5	4.832	7.049	2.439	5.7

Tabla XL Criterio de área requerida entre las curvas de GZ y brazo debido a la guiñada brusca, Atunero II.

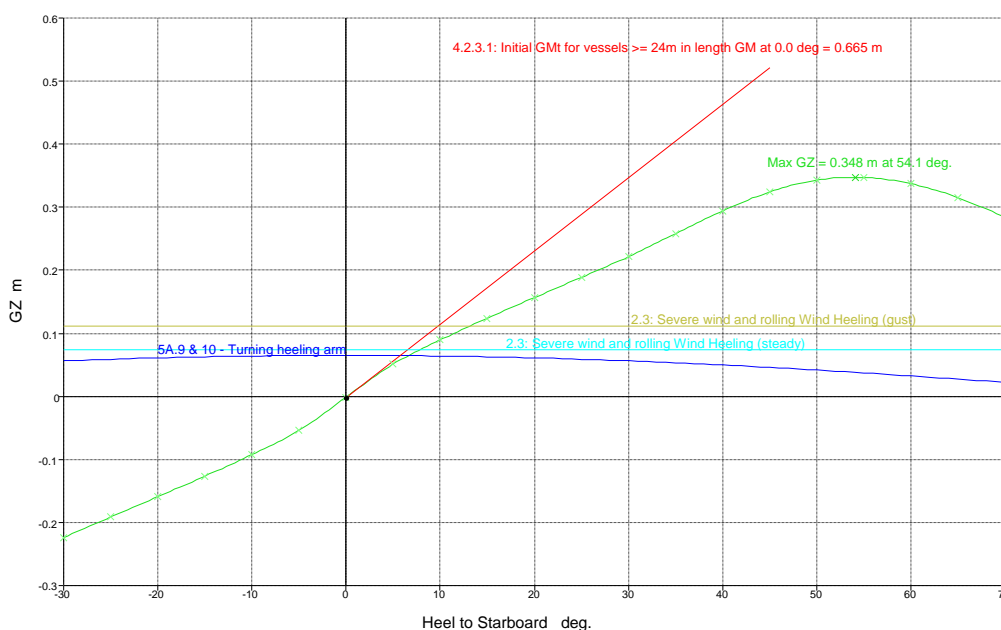


Figura No. 39 Gráfica de la curva GZ y momento debido a la guiñada brusca, nodo 9, Atunero II.

3.4.4 Primer nivel de vulnerabilidad – OMI [25]

El primer nivel de vulnerabilidad se relaciona con el factor adimensional del número de Froude, ecuación (3.27), el mismo que corresponde a un diagrama polar, a un margen de velocidad donde los buques son o no vulnerables en el primer nivel de surfteo.

Cabe mencionar que por su eslora y velocidad se sabe que muchos buques pesqueros y militares son susceptibles a falla en este criterio.

$$V_s \geq \frac{1.8\sqrt{L_{PP}}}{\cos(180^\circ - \beta)} \quad (3.29)$$

Nodo	Ángulo de encuentro (β) [°]	$\frac{1.8\sqrt{L_{PP}}}{\cos(180^\circ - \beta)}$	Crit.
1	81	-71.38	E
2	55	-19.47	E
3	32	-13.17	E
4	98	80.23	E
5	86	-160.07	E

6	140	14.58	E
7	102	53.70	E
8	118	23.78	E
9	125	19.47	E
10	111	31.16	E

Tabla XLI. Primer nivel de vulnerabilidad del modo de falla de surfeo, $L_{pp} = 38.48$ [m],
Atunero I.

Nodo	Ángulo de encuentro (β) [°]	$\frac{1.8\sqrt{L_{pp}}}{\cos(180^\circ - \beta)}$	Crit.
1	81	-75.22	E
2	55	-20.51	E
3	32	-13.87	E
4	98	84.54	E
5	86	-168.68	E
6	140	15.36	E
7	102	56.59	E
8	118	25.06	E
9	125	20.51	E
10	111	32.83	E

Tabla XLII. Primer nivel de vulnerabilidad del modo de falla de surfeo, $L_{pp} = 42.73$ [m],
Atunero II.

3.5 Buque sin propulsión y gobierno

Para el caso de modo de falla por buque sin propulsión y gobierno el Sub Comité de estabilidad propone evaluar el buque con el criterio meteorológico, con las correcciones por el MSC.1/Circ.1200 a la tabla de periodo natural de buque y paso de ola.

3.5.1 Criterio meteorológico con modificación del MSC.1200/Circ.1200, [25], comparación

La relación entre el paso de ola (la altura de ola sobre la longitud de la misma) y el periodo natural de rolo del buque debe ser corregida como se indica en la tabla del MSC.1200. A continuación se presenta una comparación entre la tabla inicial y la misma tabla corregida en el circular del 2006.

T	s		T	s
<6	0.1		<6	0.1
7	0.098		6	0.1
8	0.093		7	0.098
12	0.065		8	0.093
14	0.053		12	0.065
16	0.044		14	0.053
18	0.038		16	0.044
>20	0.035		20	0.038
			22	0.028
			24	0.025
			26	0.023
			28	0.021
			30	0.02
			>30	0.02

Tabla XLIII. Cuadro comparativo: tabla de paso de ola en el criterio meteorológico, por MSC.1/Circ.1200. En la izquierda valores correspondientes al anterior criterio meteorológico

Los periodos naturales de ambas embarcaciones atuneras son 8.60 y 8.06 segundos, respectivamente. Ingresando estos valores dentro de la Tabla XLIII se puede comprobar el paso de ola ('s') representa el mismo valor tanto en la tabla inicial como con la corrección del 2006, es decir, que los valores

obtenidos en la sección 2.3.5 de este capítulo, correspondientes a la evaluación del criterio meteorológico de ambos buques atuneros, permite comprobar que ambos buques no son vulnerables en el primer nivel del modo de falla: buque sin propulsión y gobierno.

3.5.2 Portillas de desagüe

Para el modo de falla analizado, es importante la entrada de agua en cubierta por el eventual caso de una gran escora o rompiente de ola. Esta agua debe ser correctamente desalojada, y dentro del análisis se consideran 2 tipos de referencia de área mínima que debe tener cada buque atunero.

	Atunero I	Atunero II
Área mínima, Convenio de Líneas de Carga [m ²]	1.08	1.16
Área mínima, Código de estabilidad intacta 2008 [m ²]	0.77	0.92

Tabla XLIV. Resultado de las áreas mínimas de las portillas de desagüe para ambos atuneros.

3.5.2.1 Tiempo para desalojar agua embarcada a través de las portillas de desagüe en función de frecuencia de ola.

Los buques atuneros son buques pesqueros expuestos a condiciones donde el embarque de agua es muy probable, la OMI a través de Código IS dispone que este tipo de embarcaciones posean portillas de desagüe a lo largo de la regala.

En el caso de los buques Atunero I y II presentan una cubierta expuesta, utilizada en la maniobra de captura, claramente delimitada por el inicio de la superestructura a proa y la red de pesca a popa, ambos dispuestos de banda a banda, dejando este espacio donde el agua embarcada se puede aglomerar.

La simulación de este modo de falla podría simplificarse en base al siguiente algoritmo:

- En el instante de tiempo 1, una ola produce que el agua se embarque dentro del área de la cubierta delimitada.

- En instante de tiempo 2, este volumen ingresado es desalojado a través de las portillas de manera que un volumen no constante de agua con cierta altura sale a través de un área de desagüe.
- En el instante de tiempo 3, la siguiente ola se forma y vuelve a embarcar el mismo volumen dado en el instante de tiempo 1.
- En el instante de tiempo 4 y durante la repetición de los pasos anteriores, se repetirá periódicamente en función del periodo de la ola.

Si durante el instante de tiempo 2, las portillas de desagüe no lograron desalojar todo el volumen inicial de agua ingresado, ese volumen se verá aumentado por el volumen de agua ingresado en el instante de tiempo 3, por lo que suscitará que siempre existe un volumen de agua no desalojada, este volumen afecta directamente al centro de gravedad de la embarcación y por tanto a su estabilidad en olas. El volumen no desalojado afectará directamente del periodo de la ola en la condición de mar analizada, dependiendo del área efectiva de la cubierta y el área efectiva de todas las portillas.

Para el cálculo del tiempo necesario para desalojar un fluido se utiliza la siguiente expresión [29]:

$$t = \sqrt{\left(\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1\right) * \frac{2 * H_{agua}}{g}} \quad (3.30)$$

Donde H_{agua} es la altura de agua ingresada, g la aceleración de la gravedad 9.81 [m/seg²], S_1 el área efectiva de la cubierta y S_2 área efectiva de las portillas a una banda.

En el atunero I y II los datos de entrada a la ecuación 3.28 son:

	Atunero I	Atunero II
Área efectiva de la cubierta [m ²]	68.98	75.75
Área efectiva de portillas de desagüe [m ²]	1.08	1.16

Tabla XLV. Datos de entrada para el ingreso al cálculo de tiempo para desalojar agua de cubierta por las portillas de desagüe de ambos buques atuneros.

Para la variable H_{agua} que corresponde a la altura de agua ingresada que no ha sido desalojada, la misma se puede estimar a través de la fórmula propuesta por Garkavy [16], o como se indica en la siguiente sección del proyecto (3.2.5). De cualquier modo, en las dos referencias es importante verificar el ángulo de escora en el cual se produce el ingreso por la regala, ya que, en base a este ángulo y ángulos mayores a este, se calculará la altura H_{agua} , mientras mayor sea la altura mayor será el peso que debe considerarse en la cubierta, lo que evidentemente disminuirá la altura metacéntrica.

Si al aumento en centro de gravedad del buque se suma la variación de la curva GZ con la ola en quebranto, existe una mayor probabilidad de que cualquier modo de falla de segunda generación se manifieste.

Por lo tanto, es sumamente importante el cálculo del área afectiva de portillas de desagüe y su disposición a lo largo casco, así como la consideración de un factor de seguridad para evitar al máximo este efecto desfavorable en la estabilidad.

3.5.3 Embarque de agua en cubierta, $F_n = 0.0$

En 1982 Rakhmain [3], propuso consideraciones sobre requerimientos mínimos de francobordo y estabilidad, bajo la siguiente hipótesis: “en ocasiones cuando una embarcación navega en olas de proa y popa que causa el llenado completo o parcial de la cubierta, produce un momento dinámico M_H ”. El momento dinámico de escora puede ser expresado como en la ecuación (3.29) y la Figura No. 40.

$$M_h = \kappa v w * l_w = \kappa v w * [(y_w - y_F) \cos \varphi + (z_w - z_F) \sin \varphi] \quad (3.31)$$

Donde:

κ , es coeficiente de corrección que se obtiene de la Figura No. 40

v , el volumen de agua embarcada

w , densidad del agua y

l_w , el nivel de agua respecto centro de gravedad.

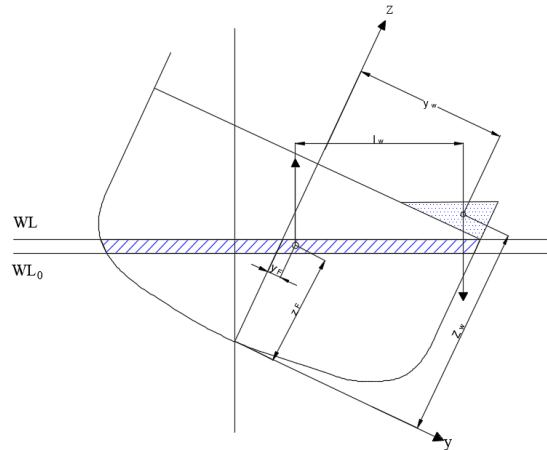


Figura No. 40. Representación de efecto de agua en cubierta, [3]

$$v = \frac{h_b^2 * l_{dw}}{2 * tg\theta_B} \quad (3.32)$$

Dentro de la propuesta se encuentran gráficas con las que debe utilizarse para poder realizar el cálculo de volumen ingresado (ecuación 3.30), así como en Figura No. 41, estas gráficas con el debido cuidado pueden ser representadas por polinomios los mismos que facilitan las iteraciones entre cada nodo.

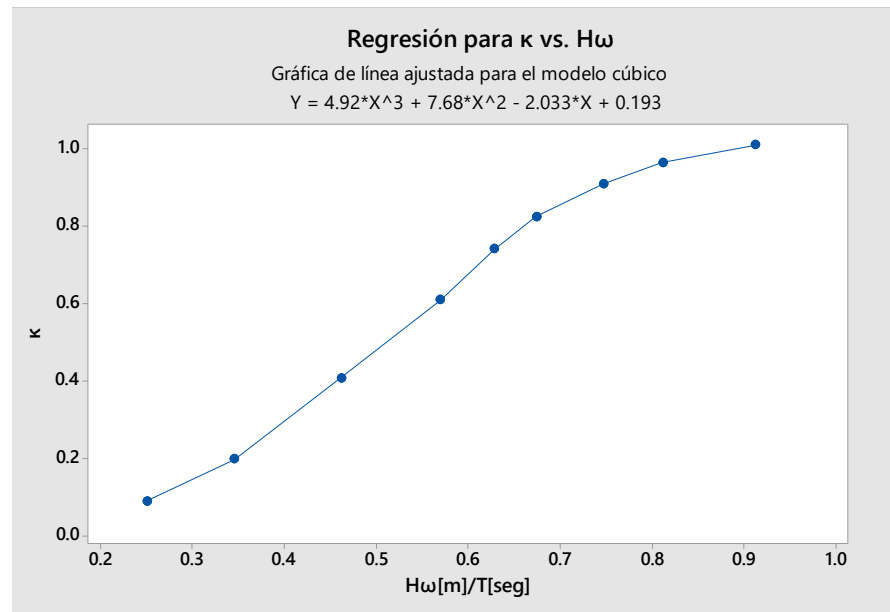


Figura No. 41. Coeficiente experimental κ . Fuente: Minitab 18, versión de prueba.
Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Una vez ordenado el proceso se procede a calcular el momento debido al ingreso de agua en cubierta para el determinado caso en donde la escora en navegación supere los 23° , medida establecida donde el ángulo de entre la flotación y la cuña de agua tiene acceso a través de la regala, asumiendo que entre la flotación y la cubierta no existe un acceso de agua considerable como para ser considerado como volumen de agua estancado en la cubierta. Los resultados de la iteración en cada nodo se presentan las Tabla XLVI y Tabla XLVII.

Nodo	$H\omega/T$	κ	M_H [ton*m]
01	0.094	0.066	1.37
02	0.189	0.050	1.05
03	0.203	0.056	1.16
04	0.189	0.050	1.05
05	0.185	0.049	1.02
06	0.170	0.046	0.95
07	0.147	0.045	0.93
08	0.180	0.048	0.99
09	0.141	0.046	0.95
10	0.116	0.053	1.11

Tabla XLVI. Cálculo de Momento de escora producido por el embarque de agua en cubierta, Atunero I

Nodo	Hw/T	κ	M _H [ton*m]
01	0.094	0.066	1.20
02	0.189	0.050	0.92
03	0.203	0.056	1.02
04	0.189	0.050	0.92
05	0.185	0.049	0.90
06	0.170	0.046	0.83
07	0.147	0.045	0.82
08	0.180	0.048	0.87
09	0.141	0.046	0.83
10	0.116	0.053	0.98

Tabla XLVII. Cálculo de Momento de escora producido por el embarque de agua en cubierta Atunero II.

Recordando que, para el caso de la guiñada súbita, de la sección 3.4.2 de este capítulo, se calcularon ángulos superiores a 23° en los respectivos nodos de cada buque atunero, es importante considerar el momento adicional por agua embarcada no desalojada en la inclinación.

3.6 Análisis de Resultados

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en el presente capítulo:

Criterio Stefan Krueger

- ✓ Se comprobó que el buque Atunero I satisface con el criterio de Stefan Krueger para altura de ola de 1.77 [m] y 2.02 [m], pero para la altura de ola obtenida del criterio meteorológico (3.42 [m]), el criterio lo detecta como inestable. Mientras que para el buque Atunero II, cumple el criterio en las tres alturas de olas evaluadas.

Rolido Paramétrico

- ✓ Para altura de ola 1/3(significativa) se cumple que los tres criterios preliminares del rolido paramétrico coinciden en resultados, determinando que el atunero 1 es susceptible en 2 nodos de navegación, mientras que el atunero 2 no es susceptible en ningún caso.

Perdida de Estabilidad

- ✓ En el modo de falla de Perdida de estabilidad, se verificó que, el parámetro de ponderación Cr1 es más cercano a la unidad en el Atunero sin embargo si se decide aumentar la velocidad de servicio, el criterio Cr1 detecta como condición vulnerable de inestabilidad. Mientras que el caso del Atunero II no presenta riesgo en este primer nivel.

Surfeo y Guiñada

- ✓ Para el modo de falla: Surfeo y Guiñada súbita, se identifica que en el primer nivel de vulnerabilidad (análisis de número de Froude) ninguna de las dos embarcaciones es vulnerables al surfeo en ninguno de los nodos analizados.
- ✓ Es importante acotar que el buque Atunero II muestra un desbalance del plano diametral, un aspecto importante a considerar dado que, en el

movimiento de guiñada, la interacción de la pala y la carena pueden contribuir a evitar en medida el modo de falla.

- ✓ El estudio de criterio del área residual permite establecer que, dentro de la ruta de navegación establecida, en caso del buque Atunero I no satisface el criterio en ningún nodo; mientras que el Atunero II cumple solo en los nodos 1, 9 y 10 relacionados con la salida y llegada a puerto, es decir olas de entre 1.5 y 1.84 [m] y sus respectivos periodos.

Buque sin Propulsión y Gobierno

- ✓ Para el caso de buque sin propulsión y gobierno se demuestra que dentro del periodo natural de rolido de ambas embarcaciones, cumplen con el criterio meteorológico sugerido por la OMI como primer nivel de vulnerabilidad.

CAPÍTULO 4

4. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD: SEGUNDA GENERACIÓN – SEGUNDO NIVEL DE VULNERABILIDAD

4.1 Rolido Paramétrico

4.1.1 Segundo Nivel [25], $F_n > 0.0$

El segundo nivel de evaluación de vulnerabilidad para el rolido paramétrico consiste en dos etapas. El primer sub criterio requiere el cálculo de Variaciones de GM para las distintas olas de cada nodo, así como un control de vulnerabilidad para una velocidad crítica de avance del buque.

El segundo sub criterio es aplicable si el buque es vulnerable en el primer sub criterio, y se basa en la respuesta en el ángulo de rolido en las condiciones de ruta con olas proa y popa. Y donde se considera vulnerable si, el coeficiente $C2 > 0.15$, en la siguiente ecuación se detalla como calcular el coeficiente $C2$:

$$C2 = \sum_{i=1}^N W_i c_i \quad (4.1)$$

Donde el valor binario c_i , toma el valor de uno y la respuesta al rolido en la iteración sub-i es superior 25° , los factores de ponderación, W_i , se obtienen a partir de una representación de un área operativa sin restricciones (océano Norte Atlántico).

Los valores de ponderación fueron sugeridos en el documento de IMO-SDC 2 WP4 del 2015 [25], con la siguiente distribución:

Caso	Altura de ola [m]	Ponderación de la ola, W_i
1	0.35	0.00001
2	0.495	0.00165
3	0.857	0.02090

4	1.295	0.09280
5	1.732	0.19900
6	2.205	0.24880
7	2.697	0.20870
8	3.176	0.12900
9	3.625	0.06245
10	4.04	0.02479
11	4.421	0.00836
12	4.769	0.00247
13	5.097	0.00066
14	5.37	0.00016
15	5.621	0.00003
16	5.95	0.00001

Tabla XLVIII. Función de probabilidad, W_i , respecto de la altura de ola.

Siendo esta una representación de 16 casos independientes cada una con su altura significativa, siendo una ponderación la integración de la distribución gaussiana se puede expresar en un polinomio que permita utilizar en función de la altura de ola, Figura No. 42, la incidencia de cada ola en el estudio de cada nodo.

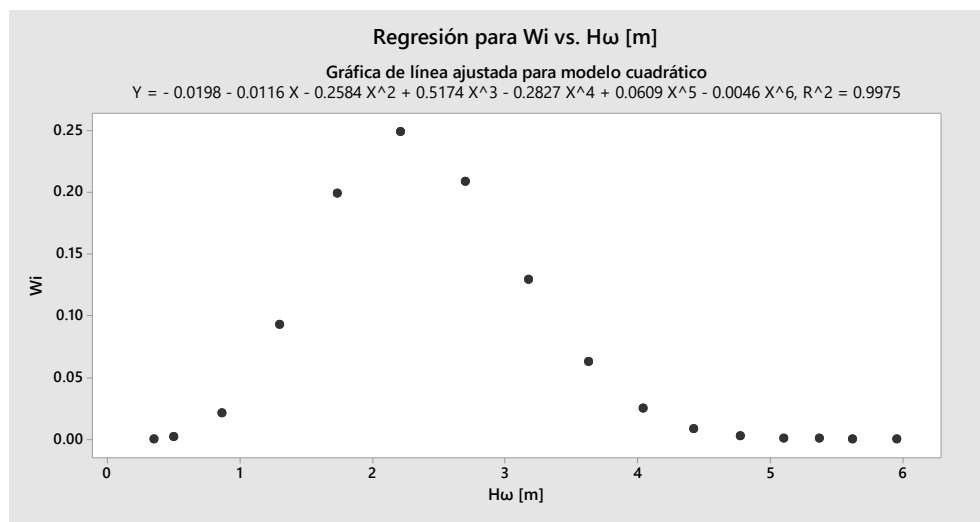


Figura No. 42. Función de ponderación respecto de altura de ola. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

De forma analógica en el primero sub criterio se aplica la ecuación (4.2) donde el factor c_i es un valor binario que tiene como valor cero si se cumple la condición de la ecuación (4.3):

$$C1 = \sum_{i=1}^N W_i c_i \quad (4.2)$$

$$GM(H_i, \lambda_i) > 0 \text{ y } \frac{\Delta GM(H_i, \lambda_i)}{GM(H_i, \lambda_i)} < R_{PR} \quad (4.3)$$

Adicionalmente es necesario que se cumpla que la velocidad en el nodo debe encontrarse en el rango donde el rolido paramétrico ocurre, la velocidad de servicio debe ser menor que la presentada en la ecuación (4.3), para que $c_i = 0$. El buque se considera vulnerable en la primera comprobar si el valor alcanzado del índice C1 es mayor que el valor umbral 0.06.

$$V_{PR} = \left\| \frac{2\lambda_i}{T_\phi} \sqrt{\frac{GM(H_i \lambda_i)}{GM}} - \sqrt{g \frac{\lambda_i}{2\pi}} \right\| \quad (4.4)$$

A seguir en la Tabla XLIX se presentan los cálculos realizados en cada nodo y en las respectivas alturas de ola significativas en ambos atuneros:

		T_ϕ [seg]	V_{PR} [m/seg]	c_1	W_i	C1	Crit.
1	Hprom	8.67	6.29	0	0.004	0.212	
	H1/3	8.70	6.05	0	0.059		
	H1/10	8.70	5.91	0	0.124		
	H1/100	11.47	4.33	1	0.212		
2	Hprom	8.70	5.93	0	0.118	0.548	
	H1/3	14.59	4.49	1	0.247		
	H1/10	22.11	5.25	1	0.207		
	H1/100	100.00	7.16	1	0.094		
3	Hprom	8.70	5.97	0	0.104	0.57	
	H1/3	13.79	4.42	1	0.242		
	H1/10	19.32	4.98	1	0.224		
	H1/100	100.00	7.17	1	0.104		
4	Hprom	8.70	5.93	0	0.118	0.548	
	H1/3	14.59	4.49	1	0.247		

	H1/10	22.11	5.25	1	0.207		
	H1/100	100.00	7.16	1	0.094		
5	Hprom	8.70	5.84	0	0.146	0.515	I
	H1/3	16.30	4.67	1	0.247		
	H1/10	39.79	6.37	1	0.165		
	H1/100	100.00	7.14	1	0.102		
6	Hprom	8.70	5.93	0	0.118	0.547	I
	H1/3	14.59	4.49	1	0.248		
	H1/10	22.11	5.25	1	0.206		
	H1/100	100.00	7.16	1	0.093		
7	Hprom	8.70	6.05	0	0.077	0.147	I
	H1/3	12.34	4.34	1	0.221		
	H1/10	16.47	4.68	1	0.246		
	H1/100	88.97	7.12	1	0.147		
8	Hprom	8.70	5.97	0	0.104	0.57	I
	H1/3	13.79	4.42	1	0.242		
	H1/10	19.32	4.98	1	0.224		
	H1/100	100.00	7.17	1	0.104		
9	Hprom	8.67	6.29	0	0.003	0.211	I
	H1/3	8.70	6.05	0	0.059		
	H1/10	8.70	5.91	0	0.124		
	H1/100	11.47	4.33	1	0.211		
10	Hprom	8.64	6.39	0	0.001	0	E
	H1/3	8.68	6.16	0	0.025		
	H1/10	8.70	6.03	0	0.068		
	H1/100	8.70	5.84	0	0.146		

Tabla XLIX. Criterio de rango de velocidad, modo de falla rolido paramétrico, Atunero I.

		T_{φ} [seg]	V_{PR} [m/seg]	C_1	W_i	C_1	Crit.
1	Hprom	8.02	6.03	0	0.004	0.395	I
	H1/3	8.05	5.60	1	0.059		
	H1/10	8.26	5.41	1	0.124		
	H1/100	10.42	3.98	1	0.212		
2	Hprom	8.06	5.71	0	0.118	0.548	I
	H1/3	11.31	3.86	1	0.247		
	H1/10	15.21	4.33	1	0.207		

	H1/100	18.31	5.16	1	0.094		
3	Hprom	8.06	5.45	1	0.104	0.674	
	H1/3	11.13	3.89	1	0.242		
	H1/10	14.58	4.23	1	0.224		
	H1/100	20.30	5.41	1	0.104		
4	Hprom	8.06	5.71	0	0.118	0.548	
	H1/3	11.31	3.86	1	0.247		
	H1/10	15.21	4.33	1	0.207		
	H1/100	18.31	5.16	1	0.094		
5	Hprom	9.23	4.40	1	0.146	0.661	
	H1/3	12.53	3.95	1	0.247		
	H1/10	17.44	5.02	1	0.165		
	H1/100	22.96	5.64	1	0.102		
6	Hprom	8.06	5.71	0	0.118	0.547	
	H1/3	11.31	3.86	1	0.248		
	H1/10	15.21	4.33	1	0.206		
	H1/100	18.31	5.16	1	0.093		
7	Hprom	8.05	5.55	1	0.077	0.691	
	H1/3	10.60	3.96	1	0.221		
	H1/10	12.65	3.97	1	0.246		
	H1/100	18.31	5.18	1	0.147		
8	Hprom	8.06	5.45	1	0.104	0.674	
	H1/3	11.13	3.89	1	0.242		
	H1/10	14.58	4.23	1	0.224		
	H1/100	20.30	5.41	1	0.104		
9	Hprom	8.02	6.03	0	0.003	0.393	
	H1/3	8.05	5.60	1	0.059		
	H1/10	8.26	5.41	1	0.124		
	H1/100	10.42	3.98	1	0.211		
10	Hprom	8.00	6.24	0	0.001	0.214	
	H1/3	8.04	5.70	0	0.025		
	H1/10	8.05	5.58	1	0.068		
	H1/100	9.23	4.40	1	0.146		

Tabla L. Criterio de rango de velocidad, modo de falla de rolido paramétrico, Atunero II.

Para que el buque se considere vulnerable debe cumplir los dos subniveles, a continuación se presentan los resultados de la segunda etapa de respecto de cada nodo analizado:

	φ [°]	Atunero I	Atunero II
1	φ prom.	2.87	3.27
	φ 1/3	4.58	5.21
	φ 1/10	5.81	6.62
	φ 1/100	7.63	8.70
2	φ prom.	3.73	1.39
	φ 1/3	5.95	2.23
	φ 1/10	7.56	2.83
	φ 1/100	9.93	3.71
3	φ prom.	2.22	0.86
	φ 1/3	3.55	1.37
	φ 1/10	4.50	1.74
	φ 1/100	5.92	2.28
4	φ prom.	4.62	5.28
	φ 1/3	7.38	8.42
	φ 1/10	9.37	10.70
	φ 1/100	12.31	14.05
5	φ prom.	5.18	6.04
	φ 1/3	8.27	9.64
	φ 1/10	10.50	12.24
	φ 1/100	13.79	16.08
6	φ prom.	4.63	2.19
	φ 1/3	7.39	3.50
	φ 1/10	9.38	4.44
	φ 1/100	12.32	5.83
7	φ prom.	3.31	3.85
	φ 1/3	5.28	6.15
	φ 1/10	6.70	7.81
	φ 1/100	8.80	10.26
8	φ prom.	3.03	3.41
	φ 1/3	4.83	5.44
	φ 1/10	6.13	6.90
	φ 1/100	8.05	9.07
9	φ prom.	0.93	1.17
	φ 1/3	1.49	1.87
	φ 1/10	1.89	2.38
	φ 1/100	2.49	3.12
10	φ prom.	1.20	1.64

	$\Phi_{1/3}$	1.91	2.62
	$\Phi_{1/10}$	2.43	3.33
	$\Phi_{1/100}$	3.19	4.37

Tabla LI. Criterio de rolido de respuesta en el nivel de vulnerabilidad II del modo de falla rolido paramétrico, ambos atuneros.

Resultando que en ninguno de los nodos analizados se presenta una escora significativa, es decir superior a 25° , por lo que el valor de $C2 = 0.0$, lo que va a determinar que ambas embarcaciones no sean vulnerables en este criterio, pese a mostrar falla en el subcriterio 1.

4.1.2 Segundo Nivel, $F_n = 0.0$

Es preciso recordar que la función de rolido en el movimiento dinámico del buque se encuentra directamente relacionado con el amortiguamiento. En los dos buques atuneros, se ha considerado la corrección de velocidad en el amortiguamiento, donde este valor se incrementa considerablemente respecto del amortiguamiento sin velocidad.

A manera demostración de la diferencia entre los resultados en segundo subcriterio, cuando no se considera la corrección por velocidad en el amortiguamiento, se presenta a seguir las respuestas en rolido en cada uno de los nodos para los dos buques atuneros:

	$\phi [^\circ]$	Atunero I	Atunero II
1	$\Phi_{prom.}$	6.24	5.36
	$\Phi_{1/3}$	9.96	8.55
	$\Phi_{1/10}$	12.65	10.86
	$\Phi_{1/100}$	16.62	14.26
2	$\Phi_{prom.}$	1.53	1.41
	$\Phi_{1/3}$	2.45	2.26
	$\Phi_{1/10}$	3.11	2.86
	$\Phi_{1/100}$	4.08	3.76
3	$\Phi_{prom.}$	0.90	0.86
	$\Phi_{1/3}$	1.44	1.38
	$\Phi_{1/10}$	1.83	1.75
	$\Phi_{1/100}$	2.41	2.30
4	$\Phi_{prom.}$	11.40	7.98

	Φ 1/3	18.19	12.74
	Φ 1/10	23.10	16.19
	Φ 1/100	30.34	21.26
5	Φ prom.	8.23	14.38
	Φ 1/3	13.14	22.95
	Φ 1/10	16.68	29.15
	Φ 1/100	21.91	38.28
6	Φ prom.	4.02	4.63
	Φ 1/3	6.41	7.40
	Φ 1/10	8.15	9.39
	Φ 1/100	10.70	12.34
7	Φ prom.	6.22	7.63
	Φ 1/3	9.93	12.19
	Φ 1/10	12.61	15.48
	Φ 1/100	16.57	20.33
8	Φ prom.	5.02	4.71
	Φ 1/3	8.02	7.52
	Φ 1/10	10.18	9.55
	Φ 1/100	13.37	12.54
9	Φ prom.	1.52	1.44
	Φ 1/3	2.43	2.30
	Φ 1/10	3.09	2.92
	Φ 1/100	4.06	3.83
10	Φ prom.	1.58	3.06
	Φ 1/3	2.53	4.89
	Φ 1/10	3.21	6.21
	Φ 1/100	4.21	8.15

Tabla LII. Criterio de respuesta en segundo nivel de vulnerabilidad del modo de falla rolido paramétrico, en ambos buques atuneros

Como se evidencia en la Tabla LII al reducir el valor coeficiente de amortiguamiento, la respuesta del buque al rolido aumenta, y en los nodos 4 y 5 con escoras superiores a 25°, por lo que determina que para este caso en particular, podría haber ocasionado erróneamente la susceptibilidad del buque al rolido en el segundo nivel de vulnerabilidad y por ende llevar a cálculos más extensos en un hipotético tercer nivel de vulnerabilidad.

4.2 Pérdida de Estabilidad

4.2.1 Segundo Nivel [25]

Para evaluar este criterio, es necesario conocer cuáles fueron los puntos donde la curva de GM, con su variación en olas, cumplen con el primer nivel de vulnerabilidad, valores inferiores al crítico, 0.15 [m].

Cada uno de estos puntos de GM que fallaron en el primer nivel, se correlaciona con su respectiva curva GZ. El criterio se basa en evaluar esta curva en puntos críticos, como:

- El ángulo inicial de estabilidad (loll angle)
- El ángulo donde finaliza la estabilidad (vanish angle).
- y el máximo valor alcanzado por la curva GZ, figura No. 35.

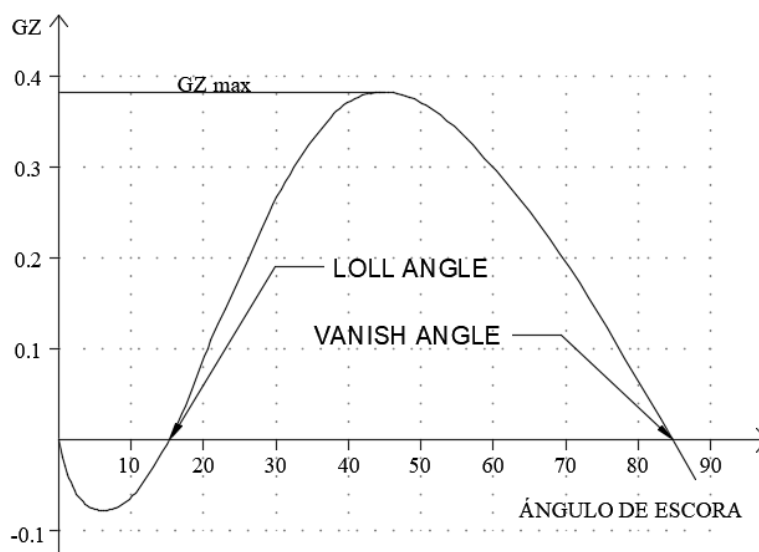


Figura No. 43. Identificación de parámetros en la curva GZ. Fuente: [10]

El criterio toma el valor máximo alcanzado por las ponderaciones de los subcriterios, de la ecuación (4.5), y si este valor escogido supera 0.06, se considera vulnerable.

$$CR1 = \sum_{i=1}^N W_i C1_i, CR2 = \sum_{i=1}^N W_i C2_i, CR3 = \sum_{i=1}^N W_i C3_i \quad (4.5)$$

El tercer ítem, de ecuación (4.5) corresponde al ángulo máximo que puede tomar la curva GZ. Mientras que CR1 y CR2 se encuentran relacionados con los ángulos de inicio y finalización de valores positivos de la curva GZ, [25].

El requerimiento de GZ corresponde al determinado en la ecuación (4.6) y es el valor con el cual será comparado las curvas detectadas en el primer nivel de vulnerabilidad.

$$R_{GZmax} = 8 * \frac{H_i}{\lambda_i} * d * Fn^2 \quad (4.6)$$

Donde H_i y λ_i corresponden a las propiedades de altura y longitud de ola en el nodo sub-i analizado, d el calado inicial y Fn el número de Froude a la velocidad de servicio.

Las variaciones de curva GZ detectadas por el primer nivel de vulnerabilidad en caso del buque Atunero I, son graficadas en la Figura No. 44 y el resumen de resultados en la Tabla LIII:

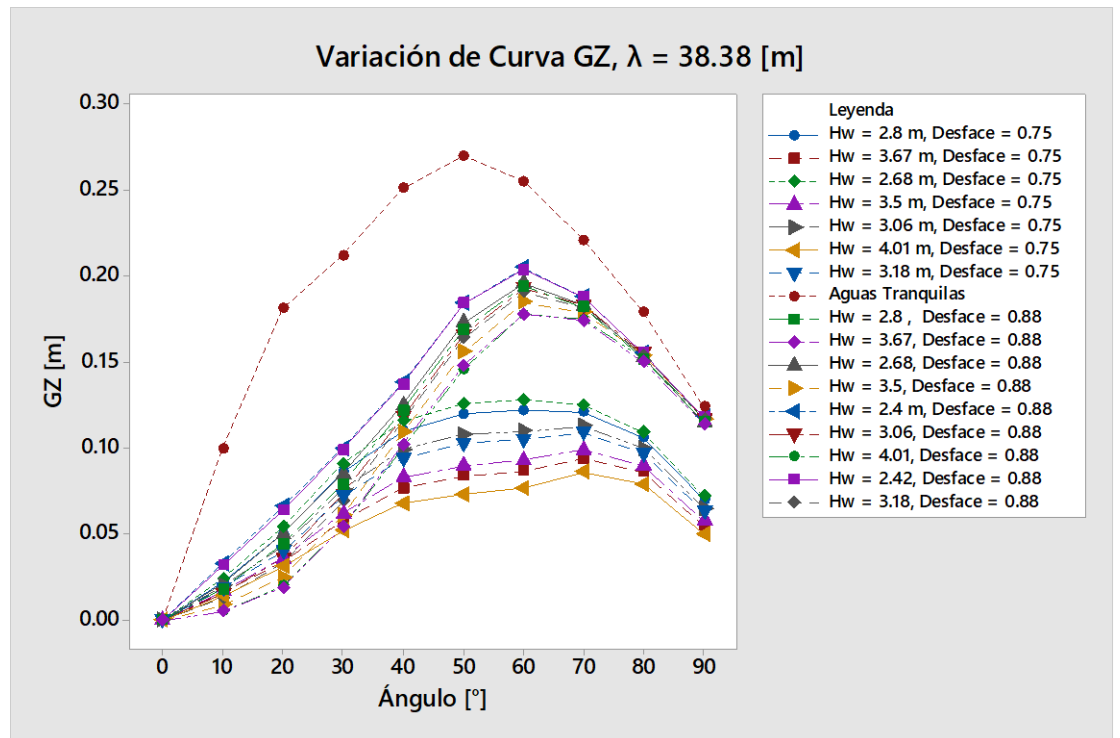


Figura No. 44 Curvas GZ correspondientes a los GM olas detectados en el criterio de Perdida de Estabilidad, primer nivel de vulnerabilidad ($GM < 0.15$ [m]), Atunero I, sección 3.3.1 del presente proyecto.

		GZ max [m]	GZ crit.	c_3	W_i	CR_3
Desface de ola a largo de L_{pp} = 0.75	$H_\omega = 2.80$ [m]	0.122	0.16	1	0.207	0.21
	$H_\omega = 3.67$ [m]	0.094	0.12	1	0.094	0.09
	$H_\omega = 2.68$ [m]	0.128	0.154	1	0.224	0.22
	$H_\omega = 3.50$ [m]	0.099	0.201	1	0.104	0.10
	$H_\omega = 3.06$ [m]	0.113	0.175	1	0.165	0.17
	$H_\omega = 4.01$ [m]	0.086	0.23	1	0.102	0.10
	$H_\omega = 3.18$ [m]	0.109	0.182	1	0.147	0.15
	$H_\omega = 0.0$ [m]	0.27				
Desface de ola a largo de L_{pp} = 0.88	$H_\omega = 2.8$ [m]	0.194	0.16	0	0.207	0
	$H_\omega = 3.67$ [m]	0.178	0.21	1	0.094	0.094
	$H_\omega = 2.68$ [m]	0.196	0.154	0	0.224	0
	$H_\omega = 3.50$ [m]	0.185	0.201	1	0.104	0.104
	$H_\omega = 2.40$ [m]	0.205	0.138	0	0.165	0
	$H_\omega = 3.06$ [m]	0.193	0.175	0	0.102	0

	$H_{\omega} = 4.01 [m]$	0.178	0.23	1	0.147	0.147
	$H_{\omega} = 2.42 [m]$	0.204	0.139	0	0.246	0
	$H_{\omega} = 3.18 [m]$	0.191	0.182	0	0.147	0

Tabla LIII. Resumen de Resultados del segundo criterio de vulnerabilidad del modo de falla: Pérdida de Estabilidad, CR3, Atunero I.

Como se evidencia en la Figura No. 44, en todos los casos el ángulo de inicio ('*loll angle*') de estabilidad es menor a 25° , por lo tanto, el CR1 toma el valor de 0 en todos los casos. De igual manera, el ángulo final de estabilidad ('*vanish angle*') es superior a 30° , por lo que la ponderación CR2 equivale a 0.

Dentro de la Tabla LIII, el valor binario C_3 equivaldrá a 1 si el GZ máximo no supera al GZ_{crit} , este valor 0 o 1, sea el caso, se multiplica por la función de probabilidad (W_i) a su respectiva altura de ola (H_{ω}). La suma de todos los valores obtenidos en cada una de las alturas significativas y cada uno de los nodos, deberá ser inferior a 0.06, caso contrario se determina entonces que el buque es susceptible a la pérdida pura en segundo nivel de vulnerabilidad. En base a los resultados obtenidos en la Tabla LIII el buque Atunero I es vulnerable en este nivel.

De manera similar se analiza los puntos detectados en el primer nivel de vulnerabilidad del modo de falla correspondiente al buque Atunero II, en la Figura No. 45 y Tabla LIV:

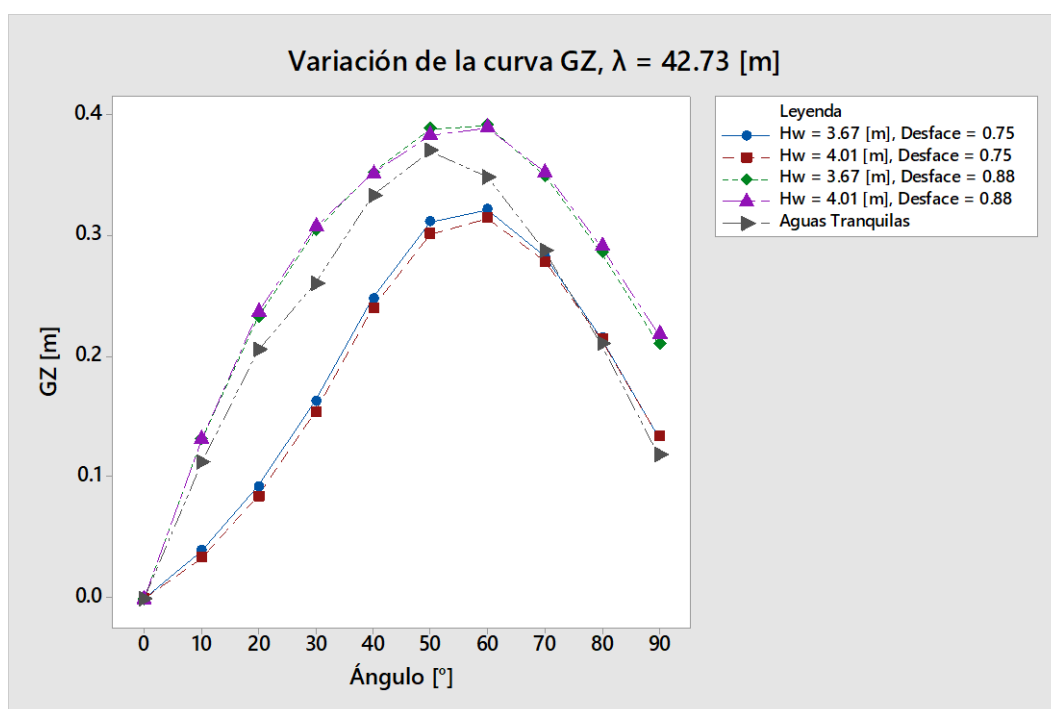


Figura No. 45 Curvas GZ correspondientes a los GM olas detectados en el criterio de Perdida de Estabilidad, primer nivel de vulnerabilidad ($GM < 0.15$ [m]), Atunero II.

Como en el caso del Atunero I, los sub criterios CR1 y CR2 toman el valor de cero, y contrariamente el Atunero II en el sub criterio CR3 adquiere cero en todos los casos, ya que GZ crítico no es superior al máximo adquirido por la variación de curva GZ.

		GZ max [m]	GZ crit.	c_3	W_i	CR ₃
Desface de ola a largo de $L_{pp} = 0.75$	$H_\omega = 3.67$ [m]	0.321	0.182	0	0.094	0
	$H_\omega = 4.01$ [m]	0.314	0.199	0	0.147	0
	$H_\omega = 0.0$ [m]	0.37				
Desface de ola a largo de $L_{pp} = 0.88$	$H_\omega = 3.67$ [m]	0.391	0.182	0	0.094	0
	$H_\omega = 4.01$ [m]	0.389	0.199	0	0.147	0

Tabla LIV. Resumen de Resultados del segundo criterio de vulnerabilidad del modo de falla: Perdida de Estabilidad, CR3, Atunero II.

Por lo que determina que el Atunero II no es susceptible al segundo nivel de vulnerabilidad del modo falla: Perdida de estabilidad.

4.3 Surfeo y Guiñada Súbita

4.3.1 Segundo Nivel [25]

A continuación, se presenta una breve explicación del Método de Melnikov, el mismo que evalúa la posibilidad de que el buque, bajo ciertas consideraciones, sea capturado por la ola y produzca el surfeo.

Primero es necesario escoger la ruta de navegación, conociendo los parámetros de altura y periodo de ola a los respectivos nodos.

A seguir es necesario implementar un método para la aproximación de resistencia al avance en aguas tranquilas, el cual permita expresar la curva de resistencia vs. velocidad en un polinomio de tercer grado, ecuación (4.7):

$$R(V_S) = r_1 V_S + r_2 V_S^2 + r_3 V_S^3 \quad (4.7)$$

De igual manera un método que permita expresar la fuerza de empuje, $T(V_S, n)$, como un polinomio de segundo grado:

$$T(V_S, n) = \tau_0 n^2 + \tau_1 V_S n + \tau_2 V_S^2 \quad (4.8)$$

Donde los coeficientes τ_0, τ_1, τ_2 se expresan en función de densidad, diámetro de la hélice y los coeficientes de estela y reducción de empuje [30]

El balance entre la resistencia y el empuje puede ser expresado como una combinación de funciones en la ecuación (4.9), y coeficientes A_1, A_2, A_3 que se encuentran en función de la celeridad y la revolución al eje.

$$\begin{aligned} R(c + \dot{\xi}_G) - T(c + \dot{\xi}_G, n) \\ = A_1(c, n)\dot{\xi}_G + A_2(c)\dot{\xi}_G^2 + A_3\dot{\xi}_G^3 + R(c) - T(c, n) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Reescribiendo en función de la ecuación de movimiento, se encuentra como resultado el término n_{tr} , que corresponde a las revoluciones en el eje donde ocurre el equilibrio y por ende el surfeo.

$$M(n_{tr}) = -\frac{r(n)}{q} - \frac{4}{\pi} p_1(n) + 2p_2 - \frac{32}{3\pi} p_3 \quad (4.10)$$

Donde para evaluar la ecuación (4.10), es necesario conocer el término restante, $r(n)$, el cual se define de la relación de las funciones polinómicas de resistencia y empuje:

$$r(n) = \frac{k * (T(c, n) - R(c))}{m + m_x} \quad (4.11)$$

Los polinomios: $p_1(n), p_2, p_3$ de la ecuación (4.10) que dependen de coeficientes de la curva de resistencia al avance, coeficiente de empuje de la hélice, coeficiente de estela, coeficiente de reducción de empuje y celeridad de la ola, donde este último término se encuentra en función del período en aguas profundas.

Para el cálculo de las curvas polinómicas de resistencia se utilizó el método de Holtrop – Mennen [31] incorporado en el software 'Maxsurf Resistance', en su versión de prueba. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

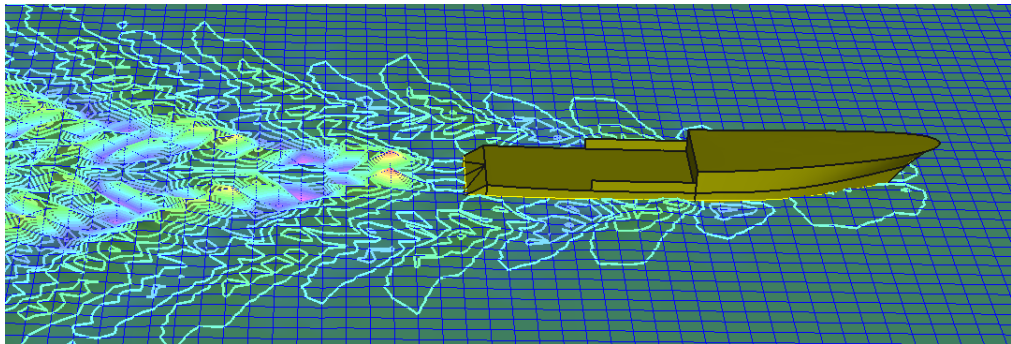


Figura No. 46 Simulación de estela formado por el Atunero I. Fuente: Maxsurf Resistance, versión de prueba.

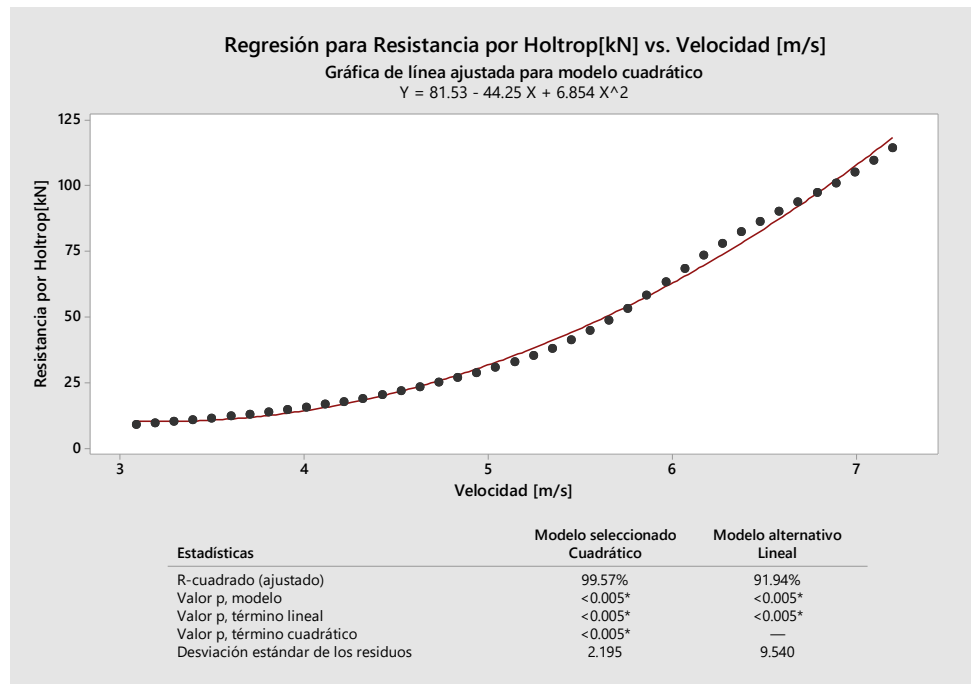


Figura No. 47 Resultados obtenidos con la aproximación de Holtrop Atunero I.
Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

En la figura No. 42 y No. 44 se obtiene los valores del polinomio, que luego permitirán el cálculo de la resistencia de la embarcación a la celeridad en el correspondiente nodo.

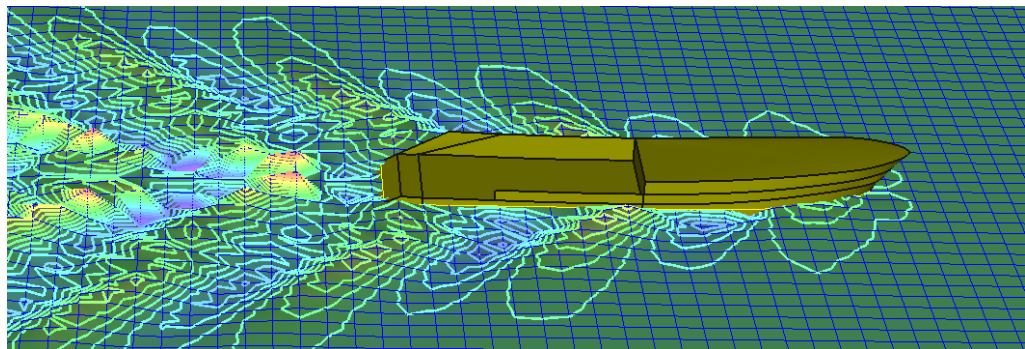


Figura No. 48 Simulación de estela formado por el Atunero II. Fuente: Maxsurf Resistance, versión de prueba.

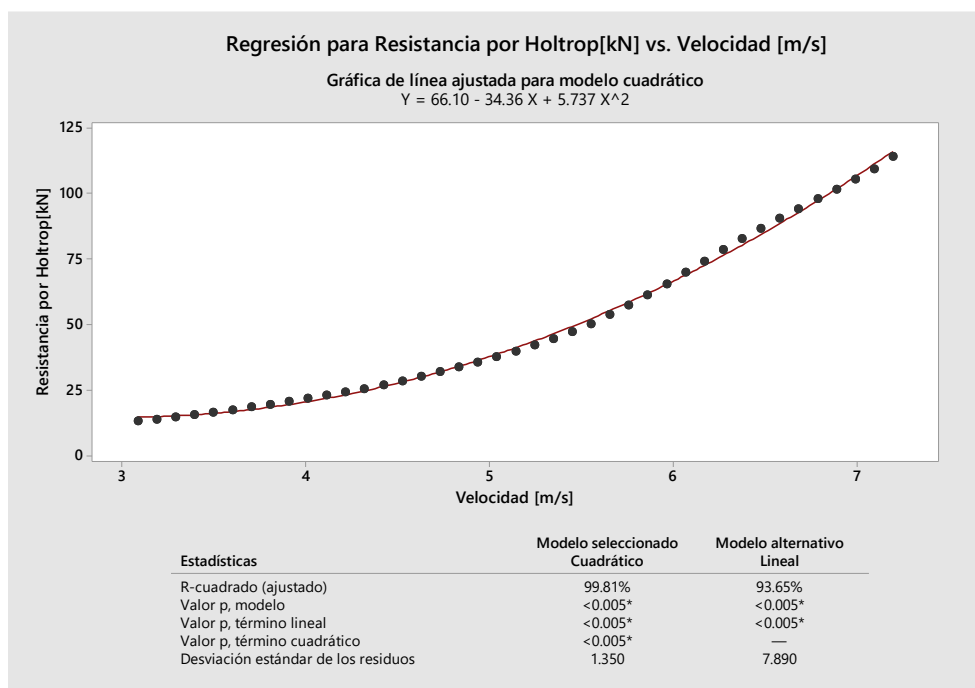


Figura No. 49 Resultados obtenidos con la aproximación de Holtrop Atunero II.
Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Los coeficientes de las curvas de resistencia son obtenidos a partir de una aproximación polinómica, en la siguiente tabla se presenta los coeficientes de ambas embarcaciones:

	Atunero I	Atunero II
r_1	131.73	64.28
r_2	-75.74	-33.21
r_3	13.193	5.50
r_4	-0.411	0.01

Tabla LV. Resultados de los coeficientes de las curvas de resistencia de ambas embarcaciones.

Una vez obtenidos los valores del polinomio de resistencia, se procede a cálculos los coeficientes propulsivos de ambas embarcaciones, los mismos que se presentan en la Tabla LVI.

	Atunero I	Atunero II
Diámetro de hélice [m]	2.05	2.08
Paso de la hélice [m]	1.73	1.75
Ae/Ao	0.554	0.741

rpm	242.42	275.55
Coefficiente de avance, J	0.5644	0.534
Coefficiente de empuje, KT	0.164	0.175
Coefficiente de torque, KQ	0.023	0.603
Empuje de la Hélice	48.6	71.2

Tabla LVI. Resultados de la estimación de los coeficientes propulsivos.

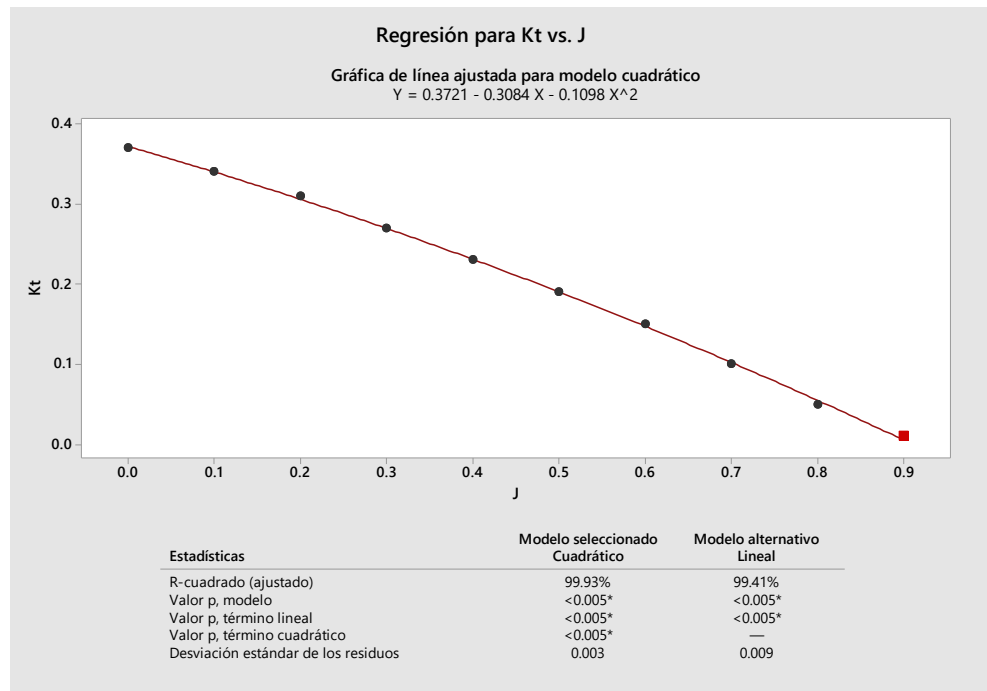


Figura No. 50 Coeficiente propulsivo, Kt del Atunero I. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

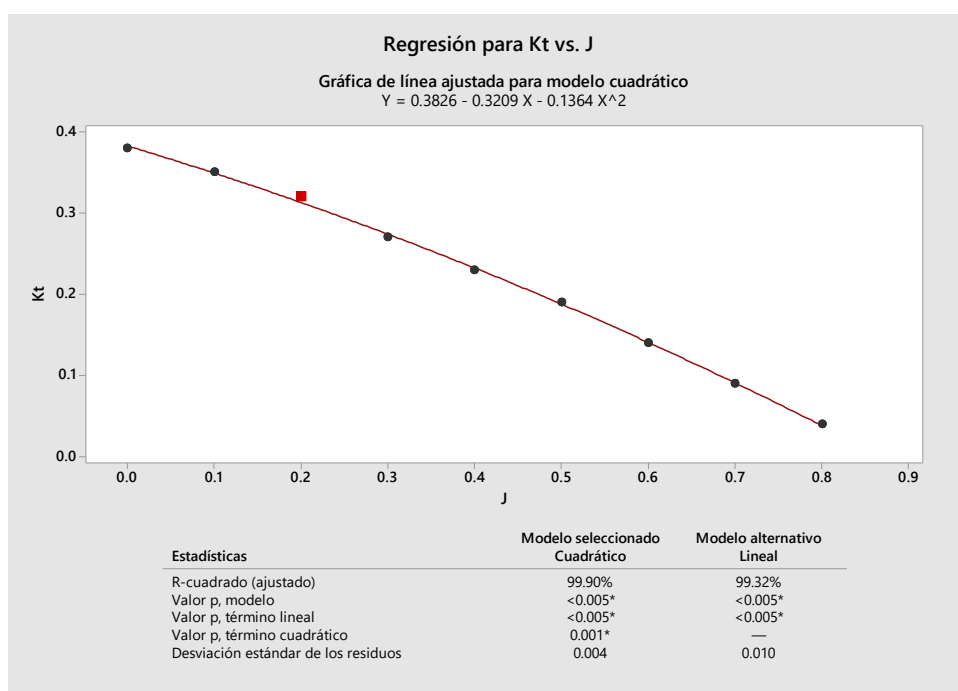


Figura No. 51 Coeficiente propulsivo, Kt del Atunero II. Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

El coeficiente propulsivo, Kt, de la Figura No. 50 y Figura No. 51, se puede representar con un polinomio de tercer orden, los resúmenes de los resultados se presentan en la tabla LVIII.

	Atunero I	Atunero II
τ_0	5.19	6.06
τ_1	-1.73	-1.88
τ_3	-0.25	-0.32
c_1	0.37	0.38
c_2	-0.31	-0.32
c_3	-0.11	-0.14

Tabla LVII. Resultados de los coeficientes de las curvas de coeficiente de empuje.

Los polinomios p_1, p_2 y p_3 , así como la ecuación (4.11) dependen de los coeficientes $\tau_i, i=1,2,3, c_i, i=1,2,3$ y $r_i, i=1,2,3$. Los resultados para cada una de las embarcaciones se encuentran en la Tabla LVII.

En una situación donde la función de la ecuación (4.10) tiende a cero, es decir $M(n) \approx 0$, las revoluciones, n , a las que suscito esta particularidad, son convertidas a su equivalente de velocidad del buque en. Si esta velocidad es superior a la velocidad de servicio, se considera que la embarcación surfea y por lo tanto es detectado como inestable [25], a seguir un resumen de resultados en cada nodo y para cada buque atunero.

Nodo	Hs[m]	T(c,n)	R(c)	q	n[1/seg]	V[m/seg]	Crit.
1	1.1	75.96	118.35	0.02	5.52	6.86	I
2	2.2	75.55	118.35	0.04	5.51	6.84	I
3	2.1	54.70	80.71	0.04	4.77	5.92	I
4	2.2	75.55	118.35	0.04	5.51	6.84	I
5	2.4	103.47	161.50	0.04	6.32	7.85	I
6	2.2	103.45	161.50	0.04	6.32	7.85	I
7	1.9	103.86	161.50	0.03	6.33	7.86	I
8	2.1	75.23	118.35	0.04	5.40	6.84	I
9	1.1	25.26	27.12	0.02	3.38	4.20	E
10	0.9	28.40	27.12	0.02	3.49	4.34	E

Tabla LVIII. Criterio Melnikov, Nivel II modo de falla surfeo, Atunero I, velocidad de servicio en [m/seg] = 5.39.

Nodo	Hs[m]	T(c,n)	R(c)	q	n[1/seg]	V[m/seg]	Crit.
1	1.1	68.59	117.58	0.01	5.04	6.35	I
2	2.2	58.00	117.58	0.03	4.81	6.06	I
3	2.1	39.11	82.19	0.03	4.10	5.17	E
4	2.2	58.00	117.58	0.03	4.81	6.06	I
5	2.4	82.59	160.50	0.03	5.56	7.00	I
6	2.2	84.58	160.50	0.03	5.59	7.05	I
7	1.9	87.72	160.50	0.02	5.65	7.13	I
8	2.1	58.63	117.58	0.03	4.82	6.08	I
9	1.1	18.97	33.78	0.01	2.96	3.74	E
10	0.9	24.18	33.78	0.01	3.15	3.97	E

Tabla LIX. Criterio Melnikov, Nivel II modo de falla surfeo, Atunero II, velocidad de servicio en [m/seg] = 5.65.

4.4 Buque sin propulsión y Gobierno

4.4.1 Segundo Nivel

4.4.1.1 Metodología [25]

El objetivo de la metodología de evaluación del segundo nivel de vulnerabilidad es proporcionar una medida de ponderación probabilística al modo de falla. Dicha ponderación, es representada con letra 'C', índice de probabilidad a largo plazo, donde si el índice es mayor a 0.04, el buque se considera vulnerable.

El procedimiento para obtener el índice 'C' se indica en la ecuación (4.12), directamente proporcional al índice de corto plazo binario 'C_{S,i}' y la función de ponderación matricial $W_i(H_S, T_Z)$ [25].

$$C = \sum_{i=1}^N W_i(H_S, T_Z) * C_{S,i} \quad (4.12)$$

4.4.1.1.1 Función de probabilidad: $W_i(H_S, T_Z)$

Cabe establecer que esta simbología, W_i , ya fue usada en los criterios evaluados anteriormente, pero en el presente modo de falla estos valores son distintos de los presentados en la sección 4.4.1.2. y no guardan relación entre ellos.

La probabilidad de ocurrencia se define como $W_i(H_S, T_Z)$, donde el subíndice "i" indica el escenario i-ésimo, en este caso los nodos seleccionados en la ruta de navegación.

Por gran cantidad de valores de función de dispersión de probabilidad, estos se presentan en el Anexo D, los mismos que deben ser dividido entre 100.000 para obtener la correspondiente probabilidad, a continuación, ver en la Figura No. 52 los valores de dispersión en una gráfica de superficie:

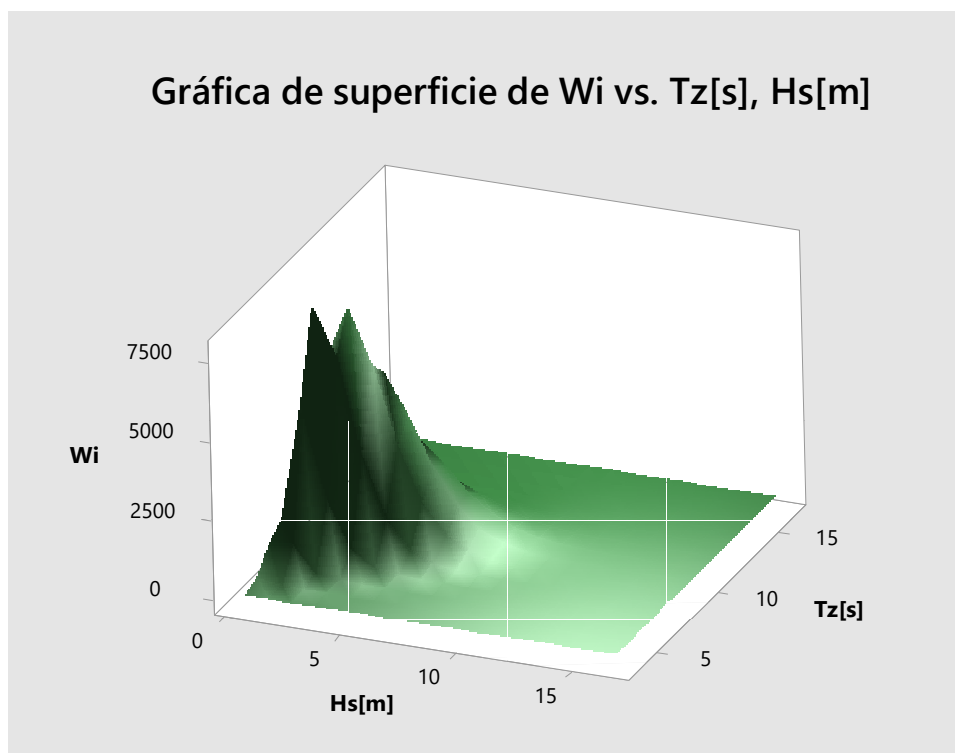


Figura No. 52. Diagrama de superficie de la probabilidad de ocurrencia W_i . Fuente: Minitab 18, versión de prueba.

Por el medio de uso de la interpolación bilineal, los valores de probabilidad de ocurrencia serán utilizados dentro de las características de cada uno de los diez nodos, en sus correspondientes periodos, T_z y alturas significativas, H_s , como se muestra en la tabla a continuación:

Nodo	$H_s[m]$	$T_z[seg]$	$W_i(H_s, T_z)$
01	1.1	11.66	35.84
02	2.2	11.66	362.44
03	2.1	10.37	1697.7
04	2.2	11.66	35.84
05	2.4	12.96	50.32
06	2.2	12.96	37.21
07	1.9	12.96	20.99
08	2.1	11.66	318.77

09	1.1	7.78	5376.2
10	0.9	7.78	4025.1

Tabla LX. Resumen de los valores de probabilidad de dispersión W_i en cada nodo, resultados tanto como para el Atunero I y Atunero II.

4.4.1.1.2 Coeficiente: $C_{S,i}$

El índice de falla a corto plazo ' $C_{S,i}$ ' se obtiene por medio de una metodología de cálculo simplificada que toma en cuenta la dinámica del rolido bajo las siguientes consideraciones:

- Condiciones meteorológicas conocidas y en términos de viento y olas.
- El estado de vientos se toma como un promedio de la velocidad del viento y un espectro de tormenta.
- El momento de escora debido al viento se determina empezando por la velocidad media del viento.
- El estado de mar es proporcional a la elevación del espectro de ola, a partir de la cual se determina directamente un espectro de pendiente de ola.
- El espectro del momento de rolido debido a ola se determina a partir del espectro de la pendiente de la ola.
- Se asume que el espectro total del momento de rolido está dado por la suma del espectro de rolido debido a la ráfaga de viento y el espectro del momento de rolido debido a la ola.
- En forma aclaratoria la simbología a seguir con subíndice positivo denota sotavento, mientras que los que tiene subíndice negativo, barlovento.

El índice de falla a corto plazo ' $C_{S,i}$ ' adquiere el valor de 1 en caso de que:

1. El momento medio de escora debido al viento de la ecuación (4.13), $\overline{l_{wind,tot}}$, supera cada punto de la curva GZ producido por de escora en sotavento.
2. La primera intersección en el ángulo debido a la acción viento constante y la curva GZ, ϕ_s , es mayor al ángulo de volcamiento en sotavento de la ecuación, $\phi_{cap,+}$.
3. Por medio del cálculo descrito en la ecuación en (4.14), éste toma el valor de 1.

$$\overline{l_{wind,tot}} = \frac{\frac{1}{2} * \rho_{air} * U_w^2 * C_m * A_L * Z}{W} [m] \quad (4.13)$$

$$C_{S,i} = 1 - \exp(-\lambda_{EA} * T_{exp}) \quad (4.14)$$

Donde:

ρ_{air} , es la densidad del aire, 1.222 [kg/m³]

U_w , la velocidad media del viento, respecto de la altura significativa del nodo [m/seg]

C_m , coeficiente de momento de escora por viento [m²], aproximadamente 1.22

Z , distancia vertical desde el centro de presión de área velica y el centro de presión de la carena [m]

A_L , área velica [m²]

W , la fuerza desplazamiento de embarcación en [N]

λ_{EA} , frecuencia de relación entre el periodo 'zero crossing' y la estabilidad residual en barlovento y sotavento.

T_{exp} , tiempo de exposición a las condiciones meteorológicas analizadas, 3600 [seg].

- En caso de primer condicional para que el coeficiente $C_{S,i}$ tome el valor de la unidad, se implementó el cálculo de brazo de escora debido al viento en cada uno de los nodos y se comparó con la curva de brazo adrizantes, como se muestra en la Tabla LXI y Tabla LXII:

Nodo	$U_w \left[\frac{m}{s} \right]$	Momento debido al viento [N*m]	$\overline{l_{wind,tot}} [m]$	Max GZ [m]
1	6.45	32776.90	0.041	0.27
2	10.24	82592.61	0.103	
3	9.92	77625.31	0.097	
4	10.24	82592.61	0.103	

5	10.85	92752.57	0.115	
6	10.24	82592.61	0.103	
7	9.28	67928.04	0.085	
8	9.92	77625.31	0.097	
9	6.45	32776.90	0.041	
10	5.64	25082.31	0.031	

Tabla LXI. Cálculo de momento escora debido al viento y comparación con el máximo valor de la curva GZ, Atunero I.

Nodo	$U_w \left[\frac{m}{s} \right]$	Momento debido al viento [N*m]	$\overline{l}_{wind,tot} [m]$	Max GZ [m]
1	6.45	29602.71	0.030	0.37
2	10.24	74594.16	0.074	
3	9.92	70107.90	0.070	
4	10.24	74594.16	0.074	
5	10.85	83770.20	0.084	
6	10.24	74594.16	0.074	
7	9.28	61349.73	0.061	
8	9.92	70107.90	0.070	
9	6.45	29602.71	0.030	
10	5.64	22653.28	0.023	

Tabla LXII. Cálculo de momento escora debido al viento y comparación con el máximo valor de la curva GZ, Atunero II.

En buque Atunero I, dado que el máximo valor de brazo escorante es 0.115 [m] en el nodo 5, y que este valor no supera al mayor alcance por la curva GZ en aguas tranquilas (0.27), se determina que a través de este condicional el coeficiente $C_{S,i}$, no toma el valor de 1.

De igual manera en el buque Atunero II, el máximo brazo debido al viento es 0.084 [m] en el nodo 5, y que evidentemente no supera el máximo valor de la curva GZ en aguas tranquilas, por lo que es necesario continuar con el segundo sub-ítem de coeficiente $C_{S,i}$.

- Para el segundo condicional es necesario el cálculo del ángulo de $\phi_{cap,+}$ sea superado por el ángulo ϕ_s , por medio la interpretación de la curva es posible verificar que esto no ocurre en ninguno de los 2 atuneros.

- Finalmente, el valor de coeficiente $C_{S,i}$, se calcula utilizando la longitud de onda dentro del área de compensación, λ_{EA} , el mismo que relaciona los ángulos y áreas dentro de la curva de brazos adrizantes tanto en el sentido positivo y su reflejo negativo, ecuación (4.15).

$$\lambda_{EA}[1/s] = \frac{1}{T_{z,C_S}} * \left[\exp\left(-\frac{1}{2 * RI_{EA+}^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2 * RI_{EA-}^2}\right) \right] \quad (4.15)$$

Donde:

T_{z,C_S} , es el periodo 'zero crossing' en el espectro de respuesta al rolido del buque por acción de viento y olas, al igual que RI_{EA+} y RI_{EA-} , los cuales corresponden a la relación entre la desviación efectiva estándar del espectro de la respuesta al rolido bajo el efecto de viento y olas, versus el rango de área residual de estabilidad en barlovento y sotavento, como se indica en las ecuaciones a seguir:

$$RI_{EA+,-} = \frac{\sigma_{C_S}}{\Delta\phi_{res, EA+,-}} \quad (4.16)$$

El cálculo de la desviación estándar del espectro de respuesta, σ_{C_S} , será explicado en detalle en la siguiente subsección, mientras que para el cálculo del de rango de área residual es necesario la identificación de ángulo clave dentro de la curva de brazos adrizantes, los mismos que se presentan a continuación en la Figura No. 53.

Mientras que en la Figura No. 54 a manera de ejemplo se presenta la identificación de los ángulos requeridos para proceder con el criterio, para el nodo de navegación 4.

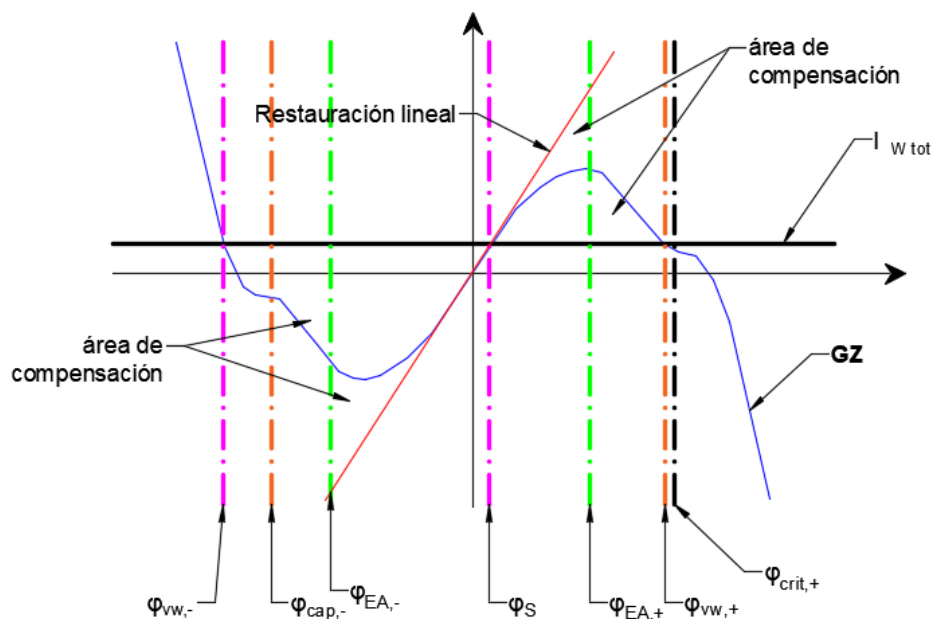


Figura No. 53 Representación gráfica de los principales ángulos en el segundo nivel de vulnerabilidad utilizando el proceso de área equivalente. Fuente: [25].

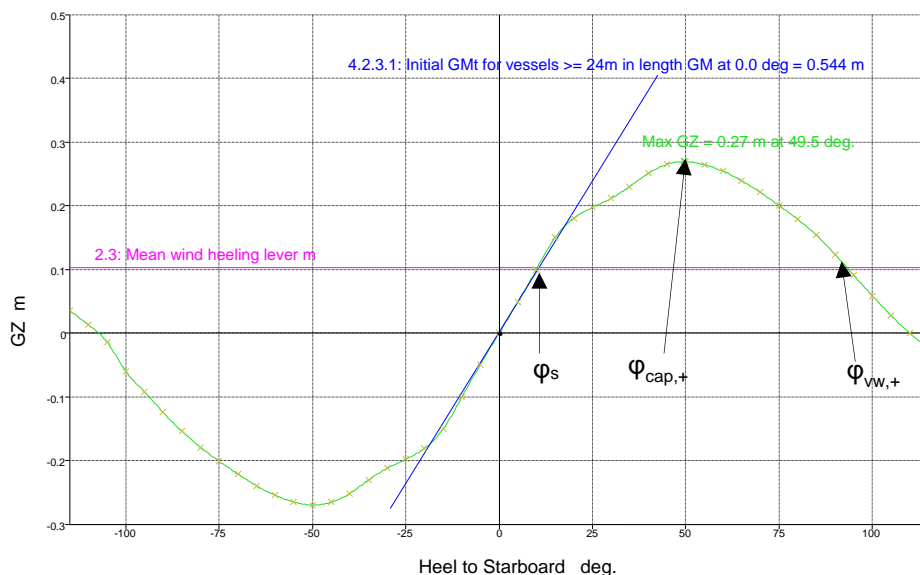


Figura No. 54 Curva de brazos adrizantes a máxima carga del Atunero I, graficada en todo el rango de estabilidad tanto en sentido positivo y su equivalente negativo, nodo 4, Atunero I. Fuente: Maxsurf Stability v.20- versión de prueba.

Si se conocen los ángulos principales en la curva GZ y su reflejo, se presenta la formulación para el cálculo del rango de área residual tanto en barlovento como sotavento:

$$\Delta\phi_{res, EA+, -} = \left(\frac{2 * A_{res, +, -}}{GM_{res}} \right)^{1/2} [rad] \quad (4. 17)$$

Donde:

$A_{res,+} [m * rad]$, es el área residual de la curva tomado desde ϕ_s hasta el ángulo $\phi_{cap,+}$

$\phi_{cap,+} [rad]$, es el valor mínimo entre $\phi_{VW,+}$ y $\phi_{crit,+}$

$\phi_{crit,+} [rad]$, el menor valor entre el ángulo de finalización de la curva GZ, 'downfloading angle ($\phi_{f,+}$)', o 50° en sotavento

$A_{res,-} [m * rad]$, es el área residual de la curva tomado desde $\phi_{cap,-}$ hasta el ángulo ϕ_s

$\phi_{cap,-} [rad]$, el valor mínimo entre $\phi_{VW,-}$ y $\phi_{crit,-}$

$\phi_{crit,-} [rad]$, el menor valor entre el ángulo de finalización de la curva GZ, 'downfloading angle ($\phi_{f,-}$)', o 50° en barlovento

GM_{res} , la altura metacéntrica tomando la pendiente de la curva GZ con punto inicial en el ángulo ϕ_s .

Una vez identificadas las variables se procede a realizar las iteraciones en cada uno de los nodos, un resumen de datos se presenta a continuación en la Tabla LXIII y Tabla LXIV:

Nodo	ϕ_s [°]	$\phi_{cap,+}$ [°]	$A_{res,+}$ [m * rad]	$\phi_{cap,-}$ [°]	$A_{res,-}$ [m * rad]	GM_{res} [m]	$\Delta\phi_{res,EA+}$ [rad]	$\Delta\phi_{res,EA-}$ [rad]
1	4.0	50	0.12	-50	0.19	0.458	0.72	0.91
2	10.0		0.072		0.244	0.539	0.52	0.95
3	9.5		0.077		0.239	0.344	0.67	1.18
4	10.5		0.072		0.244	0.598	0.49	0.90

5	11.5		0.062		0.255	0.573	0.46	0.94
6	10.5		0.072		0.244	0.598	0.49	0.90
7	8.5		0.086		0.228	0.573	0.55	0.89
8	9.5		0.077		0.239	0.552	0.53	0.97
9	4.0		0.12		0.19	0.458	0.72	0.91
10	3.0		0.128		0.182	0.516	0.70	0.84

Tabla LXIII. Cálculo los parámetros necesarios para el obtener la longitud de onda dentro del área de compensación, Atunero I.

Nodo	ϕ_s [°]	$\phi_{cap,+}$ [°]	$A_{res,+}$ [m * rad]	$\phi_{cap,-}$ [°]	$A_{res,-}$ [m * rad]	GM_{res} [m]	$\Delta\phi_{res,EA+}$ [rad]	$\Delta\phi_{res,EA-}$ [rad]
1	2.5	50	0.167	-50	0.218	0.561	0.770	0.881
2	6.8		0.131		0.257	0.674	0.624	0.873
3	6.5		0.135		0.253	0.689	0.625	0.857
4	6.8		0.131		0.257	0.674	0.624	0.873
5	7.5		0.124		0.265	0.653	0.617	0.901
6	6.8		0.131		0.257	0.674	0.624	0.873
7	5.5		0.142		0.245	0.647	0.662	0.871
8	6.5		0.135		0.253	0.689	0.625	0.857
9	3.0		0.167		0.218	0.701	0.689	0.788
10	2.2		0.172		0.212	0.643	0.731	0.812

Tabla LXIV. Cálculo los parámetros necesarios para el obtener la longitud de onda dentro del área de compensación, Atunero II.

4.4.1.2 Condiciones meteorológicas

Es necesario una caracterización de las condiciones meteorológicas en corto y largo plazo. El corto plazo la caracterización se da en términos de la velocidad media del viento, el espectro de la ráfaga de viento y el espectro de la elevación del mar, ecuación (4.18):

$$S_{ZZ}(\omega) = \frac{H_s^2}{4\pi} * \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 * \omega^{-5} * \exp\left(-\frac{1}{\pi} * \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 * \omega^{-4}\right) \quad (4.18)$$

La caracterización a largo plazo se da en términos de un diagrama de dispersión de onda. Se asume una relación determinística entre la velocidad media del viento y la ola significativa altura, ecuación (4.13):

$$U_W = \left(\frac{H_s}{0.0617} \right)^{1/1.15} \quad (4. 19)$$

La caracterización en largo plazo viene dada por medio de un diagrama de dispersión de onda. El diagrama de dispersión de onda indica la probabilidad de ocurrencia entre las diferentes condiciones del estado del mar, altura de ola significativa H_s y el periodo T_z .

Un espectro que involucre el efecto de viento, olas y respuesta del buque a las olas debe ser implementado, y sigue la siguiente ecuación [25]:

$$S(\omega) = H_{rel}^2(\omega) * S_{\alpha\alpha,c}(\omega) + H^2(\omega) * \frac{S_{\delta M wind,tot}(\omega)}{(W * GM)^2} \quad (4. 20)$$

Donde:

$$H_{rel}^2(\omega) = \frac{\omega^4 + (2 * \mu_e * \omega)^2}{(\omega_{0,e}^2(\varphi_s) - \omega^2)^2 + (2 * \mu_e * \omega)^2} \quad (4. 21)$$

$$H^2(\omega) = \frac{\omega_0^4}{(\omega_{0,e}^2(\varphi_s) - \omega^2)^2 + (2 * \mu_e * \omega)^2} \quad (4. 22)$$

Términos directamente relacionados con el periodo de ola al nodo respectivo y el termino μ_e , correspondiente al amortiguamiento del buque en el rolido y que en propósitos de la condición de buque sin maquina ni gobierno no debe incluir la corrección por velocidad, los valores utilizados fueron especificados en la sección 3.2.4, capítulo 3 de la presente tesis.

Mientras que el termino de espectro efectivo de pendiente de ola, $S_{\alpha\alpha,c}(\omega)$, sigue la siguiente formulación en función del espectro de la ecuación (4.18):

$$S_{\alpha\alpha,c}(\omega) = r^2(\omega) * \frac{\omega^4}{g^2} * S_{ZZ}(\omega) \quad (4. 23)$$

Y el espectro $S_{\delta M wind,tot}(\omega)$ puede ser calculo en base del siguiente enunciado:

$$S_{\delta M wind,tot}(\omega) = M_{wind,tot}^2 * \chi(\omega)^2 * S_v(\omega) \quad (4. 24)$$

Donde:

$M_{wind,tot}$, es el momento de escora debido al viento, y descrito en Tabla LXI y Tabla LXII.

$\chi(\omega)$, coeficiente aerodinámico estándar, que es igual a 1, y

$S_v(\omega)$, es espectro debido a la ráfaga de viento, ecuación (4.25)

$$S_v(\omega) = 4 * K * \frac{U_\omega^2}{\omega} * \frac{(600 * \frac{\omega}{\pi * U_\omega})^2}{(1 + (600 * \frac{\omega}{\pi * U_\omega})^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (4.25)$$

Donde:

$$K = 0.003, [25]$$

Con las diferentes componentes del espectro de respuesta del buque a la acción de viento y olas, ecuación (4.20), completamente identificadas y para finalizar el proceso de cálculo del coeficiente $C_{S,i}$, es necesario obtener desviación estándar del espectro a través de la integración del mismo:

$$m_0 = \int_0^\infty S(\omega)\delta\omega \quad y \quad m_2 = \int_0^\infty \omega^2 * S(\omega)\delta\omega \quad (4.26)$$

Los resultados de la integración del espectro en los diferentes nodos y su interrelación con el cálculo del área residual, determinando finalmente el valor binario del coeficiente $C_{S,i}$, a continuación los resultados en ambas embarcaciones:

Nodo	m_0	m_2	T_{Z,C_S} [seg]	$RI_{EA,+}$	$RI_{EA,-}$	λ_{EA} [1/seg]	$C_{S,i}$
1	0.006	0.002	11.66	0.109	0.087	0.000	0
2	0.029	0.009	11.66	0.032	0.180	0.001	1
3	0.044	0.016	10.37	0.316	0.179	0.001	1
4	0.034	0.010	11.66	0.375	0.203	0.002	1
5	0.035	0.008	12.96	0.400	0.197	0.003	1
6	0.032	0.007	12.96	0.364	0.197	0.002	1
7	0.019	0.005	12.96	0.254	0.156	0.000	0

8	0.019	0.010	11.66	0.361	0.204	0.002	1
9	0.024	0.016	7.78	0.213	0.169	0.000	0
10	0.016	0.010	7.78	0.179	0.150	0.000	0

Tabla LXV. Desglose de cálculo del coeficiente $C_{S,i}$ en cada uno de los nodos, Atunero I.

Nodo	m_0	m_2	T_{Z,C_S} [seg]	$RI_{EA,+}$	$RI_{EA,-}$	λ_{EA} [1/seg]	$C_{S,i}$
1	0.004	0.001	11.66	0.086	0.075	2.82E-31	0
2	0.017	0.005	11.66	0.211	0.151	1.17E-06	0
3	0.018	0.007	10.37	0.215	0.157	1.97E-06	0
4	0.024	0.007	11.66	0.247	0.176	2.34E-05	0
5	0.021	0.005	12.96	0.233	0.160	7.87E-06	0
6	0.021	0.005	12.96	0.232	0.166	7.01E-06	0
7	0.013	0.003	12.96	0.169	0.128	1.94E-09	0
8	0.023	0.007	11.66	0.245	0.179	2.08E-05	0
9	0.029	0.019	7.78	0.248	0.217	4.13E-05	0
10	0.018	0.012	7.78	0.182	0.164	3.92E-08	0

Tabla LXVI. Desglose de cálculo del coeficiente $C_{S,i}$ en cada uno de los nodos, Atunero II.

Finalmente, para la evaluación de la vulnerabilidad de ambos buques, se presentan los resultados en el buque Atunero I y dado que el caso del buque Atunero II, al momento de que el coeficiente $C_{S,i}$ no ha tomado el valor de uno en ninguno de los nodos analizados, se determina la no vulnerabilidad al criterio en análisis.

Nodo	$C_{S,i}$	$W_i(H_S, T_Z)$ /100.000	$C_{S,i} * W_i$
1	0	3.58E-04	0
2	1	3.62E-03	0.0036
3	1	1.70E-02	0.0170
4	1	3.58E-04	0.0004
5	1	5.03E-04	0.0005
6	1	3.72E-04	0.0004
7	0	2.10E-04	0.000
8	1	3.19E-03	0.0032
9	0	5.38E-02	0
10	0	4.03E-02	0

Sumatoria	0.025
Criterio: $\Sigma > 0.04 \rightarrow I$	E

Tabla LXVII. Resultados segundo criterio de vulnerabilidad del buque Atunero I.

En base a la Tabla LXVII y los resultados del buque atunero II no detecta vulnerabilidad a este modo de falla por ninguna de las dos embarcaciones.

4.5 Análisis de Resultados

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en el presente capítulo:

Rolido Paramétrico

- ✓ Se encuentra que el Atunero I no cumple con el primer subcriterio de segundo nivel de vulnerabilidad del modo de falla: Rolido Paramétrico, pero en el segundo sub nivel ambas embarcaciones cumple con ponderación del método.

Perdida de Estabilidad

- ✓ En el caso del buque atunero I, se evidencia un riesgo en el modo de falla de Perdida de Estabilidad, en el segundo nivel de vulnerabilidad, y de acuerdo a lo sugerido por las referencias: [25] [32] se debe realizar un cálculo extensivo de tercer nivel de vulnerabilidad (*'direct assessment'*) para este caso en particular.

Surfeo y Guiñada Súbita

- ✓ Se evidencia que ambas embarcaciones son susceptibles al modo de falla de surfeo, en el segundo nivel de vulnerabilidad, para sus respectivos nodos en particular, determinándose la necesidad de llevar este cálculo al tercer nivel de vulnerabilidad.

Buque sin Propulsión y Gobierno

- ✓ En base a los resultados obtenidos se determina que ninguna de las embarcaciones es detectas con vulnerables en el segundo nivel de vulnerabilidad, dado que el área residual y la respuesta del buque al rolido debido a efecto de viento y olas satisfacen los requerimientos del criterio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Resonancia Paramétrica – Criterios de Coincidencias

1. El estudio de la resonancia paramétrica y pérdida de estabilidad obedece en gran medida al cálculo de estabilidad en olas, cálculo del coeficiente de amortiguamiento y la variación de la altura metacéntrica donde cada uno interviene como factor directo al riesgo de zozobra. El Atunero I es vulnerable a ambos fenómenos en el primer nivel de vulnerabilidad en nodos 6 y 8, a una velocidad de servicio de 11 nudos.

Resonancia Paramétrica – Primer nivel de Vulnerabilidad

2. Por parte del primer sub nivel de rolido paramétrico se concluye que el Atunero I presenta vulnerabilidad relativo a periodo de encuentro, con una altura de ola de $H_{1/10}$ en los nodos cercanos al caladero (4, 5 y 6), mientras que el Atunero I no evidencia susceptibilidad más que a la altura de ola de $H_{1/100}$. De igual manera el segundo subnivel relativo a la variación de la curva GM en olas confirma la vulnerabilidad del Atunero I.

Resonancia Paramétrica – Segundo nivel de Vulnerabilidad

3. Una vez analizado los 2 sub niveles de este criterio y considerando la corrección de amortiguamiento por velocidad, se determina que las respuestas al rolido de ambas embarcaciones no son superiores a 25° en ninguno de los nodos, por lo que no demandan elevar el análisis al tercer nivel de vulnerabilidad.

Perdida de Estabilidad – Primer nivel de Vulnerabilidad

4. Una vez evaluado el tiempo promedio en el cual la cresta atraviesa la embarcación se determina el Atunero I y Atunero II no son vulnerables en este criterio considerando las velocidades referenciales, pero tan solo con el aumento de medio nudo en el caso del Atunero I ya se encuentra en la zona inestable, y

dado que no se conoce la velocidad exacta de la embarcación a máxima carga, se determina el estudio del segundo nivel de esta embarcación en particular.

Perdida de Estabilidad – Segundo nivel de Vulnerabilidad

5. En el segundo nivel de vulnerabilidad de pérdida de estabilidad, el buque Atunero I, es susceptible al modo de falla, debido a la incidencia del tercer sub criterio, correspondiente al máximo GZ alcanzado por la curva con variación en olas a los correspondientes nodos donde la curva GM es inferior a 0.15 [m]. Por lo que se comprueba que se debe analizar en un tercer nivel de vulnerabilidad.

Surfeo y Guiñada Súbita – Primer nivel de Vulnerabilidad

6. Dentro del analisis por medio del criterio de Froude y al ángulo de encuentro entre buque y la ola no se determina vulnerabilidad a la velocidad referencial, pero con el cambio gradual de 1 nudo en la velocidad de servicio, los resultados detectan la necesidad de evaluar a profundidad, por lo que se determina el análisis en el segundo nivel de cálculo.

Surfeo y Guiñada Súbita – Segundo nivel de Vulnerabilidad

7. De los resultados obtenidos del cálculo de estabilidad en segunda generación, en el modo de falla: surfeo y guiñada súbita se ha determinado que tanto el buque Atunero I y II al sobrepasar los 11 nudos son vulnerable. Además, se determinaron los ángulos de escora en la guiñada súbita y el cálculo del área residual, los cuales concuerdan con la vulnerabilidad de las embarcaciones, siendo notable la posible pérdida de estabilidad para el Atunero I, por lo que es evidente el análisis en el tercer nivel de cálculo.

Buque sin propulsión y gobierno – Primer nivel de Vulnerabilidad

8. Con respecto al comportamiento del atunero I y II en la condición de buque sin propulsión ni gobierno, se determinó que ambos buques cumplían con el criterio meteorológico y su variación en el circular MSC.1200, sin detectar fallo en este nivel. Pero, dado que de los 4 modos de falla identificados por OMI, la condición

del buque sin propulsión y gobierno aún se encuentra en desarrollo, se precisa proceder con el siguiente nivel en caso de ambas embarcaciones.

Buque sin propulsión y gobierno – Segundo nivel de Vulnerabilidad

9. Realizado los cálculos en las dos embarcaciones se concluye que ninguna es susceptible en este modo de falla para la ruta de navegación establecida.
10. Además es necesario precisar que este fenómeno en particular está directamente vinculado el cálculo de amortiguamiento sin corrección por velocidad, y por ende es importante remarcar el esfuerzo computacional que se debe realizar para que el cálculo de este coeficiente permita una buena interpretación de los distintos modos de falla detectados por la OMI.

Recomendaciones

1. Dentro del diseño preliminar de una embarcación se recomienda en función del número de Froude escoger los criterios de estabilidad de segunda generación a ser revisados, dado el volumen de cálculos que se puede generar, así como los criterios J Ramon y el Criterio de Pascual O'Dogherty con la corrección planteada en la sección 2.3.2.1 del presente documento, en caso de ser buques atuneros.
2. Se recomienda que para el uso del documento denominado como 'borrador final' de la Sub Comité de estabilidad de la OMI [25], se utilice el diagrama de flujo de la figura 4, de la sección 1.5 de la presente tesis, así como el diagrama de presentado por Szozda en 2014 [32] , debido a que es la mejor interpretación de los posibles casos que se presentan al evaluar los criterios de estabilidad de segunda generación sin dejar de lado la respectiva evaluación código IS de estabilidad, y en qué etapa del cálculo realizarlo.

Recomendaciones para futuros trabajos

1. Considerar la influencia de la variación del coeficiente de amortiguamiento de rolo, realizando un análisis en las condiciones extremas.
2. Generar un gráfico polar en función de la velocidad del buque, dirección de encuentro y altura de ola, en donde se delimiten zonas de riesgo al rolo paramétrico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Organización Marítima Internacional , «Adopción del Código Internacional de Estabilidad sin Avería,» Resolución MSC.267(85), 2008.
- [2] Diario El Comercio, «Dos muertos y tres desaparecidos en el naufragio del atunero Tuna I,» (<http://www.elcomercio.com>), Abril 2012.
- [3] L. Kobylinski, *Stability and Safety of Ships*, Baltimore: ELSEVIER, 2005.
- [4] V. Belenky, C. Bassler y J. Spyrou, «Development of Second Generation Intact Stability Criteria,» Vols. %1 de %2NSWCCD-50-TR, nº 065, 2011.
- [5] K. Spyrou, «Asymmetric Surging of Ships in Following Seas,» *Springer* , vol. *Nonlinear Dynamics*, 2006.
- [6] A. Biran y R. López-Pulido, *Ship Hydrostatics and Stability*, Oxford: Elsevier, 2014.
- [7] C. Bassler, V. Belenky, G. Bulian, A. Francescutto, K. Spyrou y N. Umeda, «Review of available Methods for Application to Second Level Vulnerability Criteria,» *Fluid Mechanics and Its Applications*, p. 21, 2011.
- [8] B. Dunwoody, «Roll of a ship in Astern Seas - Metacentric Height Spectra,» *Journal of Ship Research*, vol. 33, nº 3, 1989.
- [9] B. Dunwoody, «Ship in Astern Seas - Response to GM Fluctuations,» *Journal of Ship Research*, vol. 33, nº 04, 1989.
- [10] M. Tompuri, P. Ruponen, M. Forss y D. Lindroth, «Application of Second Generation Intact Stability Criteria in Initial Ship Design,» Napa Ltd., 2007.

- [11] P. O'Dogherty, «Comportamiento en la mar de buques pesqueros,» *Revista de Ingeniería Naval*, Vols. %1 de %2Canal de Experiencias Hidrodinamicas, El Pardo, 1974.
- [12] S. Mirsa, *Design Principles of Ships and Marine Structures*, Florida: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016.
- [13] M. Levadou y G. Guilhem, «Operational Guidance to Avoid Parametric Roll,» de *Maritime Research Institute Netherlands (MARIN)*, 2003.
- [14] D. Vassalos, A. Jasionowki y J. Cichowicz, «Wheather Criteria - Questions and Answers,» de *8th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Madrid, 2003.
- [15] S. Kruger y F. Kluwe, «Evaluation of Minimum Stability Requirements for Ships in Following Seas taking into account Dynamic Effects,» 2006.
- [16] V. Belenky y N. Sevastianov, *Stability and Safety of Ship: Risk of Capsizing*, Jersey City: SNAME, 2007.
- [17] T. Atatu, «Predict Wind,» Te Atatu, 14 07 2017. [En línea]. Available: <https://www.predictwind.com/>.
- [18] DNV, «Modelling and Analysis of Marine Operations,» DNV-RP-H103, 2011.
- [19] W. Peters, V. Belenky, S. Chouliaras y K. Spyrou, «Requirements for Computational Methods to be Used for the IMO Second Generation Intact Stability Criteria,» de *Proceedings of th 12th International Conference on th Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Glasgow, UK, June 2015.
- [20] L. M. Edward, *The Dynamics of Marine Craft*, Washington: World Scientific, 2004.

- [21] Y. Himeno, «Prediction of Ship Roll Damping - State of the Srt,» *Department of Naval Architecture and Marine Engineering - University of Michigan*, 48109 1981.
- [22] I. International Towing Tank Conference, «Numerical Estimation of Roll Damping,» 2011.
- [23] H. Moideen, «Prediction of Parametric Roll of Ships in Regular and Irregular sea,» Office of Graduate Studies of Texas A&M University, Texas, 2010.
- [24] M. Sotelo, «Simulación Numérica de Problemas de Estabilidad debido a Balance Paramétrico, en Buques Pesqueros Ecuatorianos,» FIMCBOR - ESPOL, Guayaquil, 2015.
- [25] O. M. Internacional, «Finalization of Second Generation Intact Stability Criteria,» Sub-Committee on Ship Design and Construction, SDC 3/INF.10, 2015.
- [26] D. Vásquez, «Simulación del Fenómeno de Surf-riding en Buque de la Flota Pesquera Ecuatoriana,» FIMCBOR - ESPOL, Guayaquil, 2016.
- [27] Z. Szozda, «The Need of the Revision of Passenger Ships' Stability Criterion on Account of turning,» de *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Poland, 2014.
- [28] Australian Maritime Safety Authority, «Part C Design and Construction, Section 6 Stability, Subsection 6A Intact Stability Requirements,» de *National Standard for Commercial Vessels*, Canberra, 2010, p. 112.
- [29] D. F. Young, B. R. Munson y T. H. Okiishi, *A Brief Introduction to Fluid Mechanics*, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [30] W. Peters, V. Belenky y K. Spyrou, «Regulatory Use of Nonlinear Dynamics: an Overview,» de *International Ship Stability Workshop (ISSW)*, Malaysia, 2014.

- [31] J. Holtrop y G. Mennen, «Statistical Data for the Extrapolation of Model Performance Tests,» Netherlands Ship Model Basin(NSMB), 1978.
- [32] Z. Szozda, «Examples of weaknesses of the 2nd Generation Intact,» *Scientific Journals - Maritime University of Szczecin*, vol. 40(112), n° ISSN 1733-8670, p. 8, 2014.

ANEXOS

ANEXO A

Código para el cálculo de la Inercia añadida(I_{xx})

```

function [mn5] = metodo_a44( a )
disp('          Bienvenido');
disp('Escuela Superior Politecnica del Litoral - Ecuador');
disp('Proyecto Integrador');
disp('Aplicación de los criterios de estabilidad de segunda
generación en buques atuneros: caso de estudio ');
disp('Profesor: Msc. Eng. Jhonny Dominguez');
disp('Estudiante: Oscar E. Viteri');

%lectura de dimensiones principales
inp= xlsread('dat_pas.xlsx',3,'B2:B6');
L=inp(1,1);
B=inp(2,1);
D=inp(3,1);

%lectura de Estaciones
st1= xlsread('dat_pas.xlsx',3,'B17:AQ30'); %matrix de 21
estaciones
pst= xlsread('dat_pas.xlsx',3,'A17:A37'); % numero de puntos por
cada estacion
areast= xlsread('dat_pas.xlsx',3,'B40:B60');%semi-area transversal
al calado medio

paso=L/22; %2.05
j=1;

for i=2.05:paso:(L-2.05)
    posx(j)=i;
    j=j+1;
end

% graficar estaciones
impares=(1:2:41)';
% pares=(2:2:42)';

% for jj=1:1:21
%     for k=1:1:pst(jj)
%
%         xx(k,1)= posx(jj);
%
%         yy= st1(k,impares(jj)); %impares
%         zz= st1(k,pares(jj)); %pares
%
%         plot3(xx,yy,zz,'*');
%         title('ESTACIONES - B/P "ATUNERO I"');
%         xlabel('Eslora [m]');
%         ylabel('Manga [m]');
%         zlabel('Puntal [m]');

```



```

%
%     hold on
%     end
%
% end

%.....

for jj=1:1:21

H(jj,1) = st1(1,impares(jj)) / (2*D);
beta(jj,1) = areast(jj)/(st1(1,impares(jj))*D);

p(jj,1)= beta(jj,1) - (3.1416/4);
q(jj,1)= (H(jj,1)-1)/(H(jj,1)+1);

pii=3.1416;

b(jj,1)= (( 0.75*pii + sqrt( (pii/4)^2 - (pii/2)*p(jj,1)*(1-
q(jj,1)^2) ) ) / (pii+p(jj,1)*(1-q(jj,1)^2)) )-1;
a(jj,1)= (b(jj,1)+1)*q(jj,1);

A44p(jj,1)= H(jj,1)^4 * ( 128*( a(jj,1)^2*(1+b(jj,1)^2) +
(8/9)*a(jj,1)*b(jj,1)*(1+b(jj,1)) + (16/9)*b(jj,1)^2 ) /
(pii^2*( 1+a(jj,1)+b(jj,1) )^4) );

A44pp(jj,1)= 1.025*pii*D^4*(1/8)*A44p(jj,1);%ton *m

end

disp(A44pp);
aa=trapez(posx,A44pp); %ton*m^2

disp('Valor integrado a lo largo de la eslora');
disp(aa);%ton*m^2

% plot(posx,A44pp,'-o');
% title('A44 - Atunero I');
% xlabel('Eslora[m]');
% ylabel('A44' ' [ton*m]');
% hold on

disp('.....');
disp('Fin del programa');

end

```

ANEXO B

**Datos de entrada para el cálculo de coeficiente de amortiguamiento (B_{44e})
con el código propuesto por Himeno [21]**

Nombre	Atunero I
Eslora, L [m]	38.48
Manga máxima, B [m]	7.92
Calado máximo, D [m]	4.135
Desplazamiento, Δ [ton]	803.30
Coeficiente bloque, Cb	0.54
Coeficiente de sección media, Cm	0.86
Temperatura [°C]	25
Viscosidad Cinemática [m ² /seg]	8.99E-07
Números de intervalos de numero de Froude	15
Número de estaciones para evaluar	21
SECCIÓN No.	i
Posición longitudinal de la estación, siendo 0 en Perpendicular de proa y 10 Perpendicular de popa	Xi
Semi – manga / Calado de la estación	$B_i(x) / (2 \cdot D_i(x))$
Coeficiente de área seccional de la estación i	Área seccional/ $B_i(x) \cdot D_i(x)$
Manga de la estación i[m]	$B_i(x)$
Calado de la estación i [m]	$D_i(x)$
Manga de Quilla de balance [m]	0
No. de estación en proa donde empieza la quilla de balance	0
No. de estación en popa donde finaliza la quilla de balance	0
OG/D	0

Periodo de rolido [seg], T	8.06
Amplitud de rolido [rad], θ	0.34
Coefficiente de amortiguamiento por olas a $F_n=0.0$, calculado por teoría potencial, BWOSM	0.00061

ANEXO C

Código de cálculo de coeficiente de amortiguamiento (B_{44e}) con el propuesto por Himeno

```

C      ++++++ESTIMATION      OF      ROLL
DAMPING+++++++

C      CODED BY Y.IKEDEA.

          CHARACTER*40
ARCHDATA,PROJ,ARCHRESU

          REAL L,NUE,NABLA

          DIMENSION
X(25),HO(25),SIG(25),BX(25),DX(25),B44HAT(100)

          DIMENSION
BWHAT(100),BEHAT(100),BLHAT(100)

          DIMENSION
FN(100),TITLE(70),BFHAT(100)

          WRITE(*,50)

          50 FORMAT(//,' ESTIMATION OF ROLL DAMPING'
          1 //,' CODED BY Y.IKEDEA')

C      READ(*,1000)ARCHDATA

C 1000 FORMAT(A40)

          ARCHDATA='DATOS.TXT'

          ARCHRESU='RES.TXT'

          OPEN(5,FILE=ARCHDATA)

          OPEN(6,FILE=ARCHRESU)

          READ (5,100)PROJ

          WRITE(*,100)PROJ

100  FORMAT (A40)

C      *PRINCIPAL      DIMENSIONS*-
L=LENGTH,B=BREADTH.D=DRAFT,NABLA=VOLU
M

C      **CB=BLOCK      COEFF.,CM=MIDSHIP
COEFF.,

          READ (5,*) L,B,D,NABLA,CB,CM

          WRITE(*,*)L,B,D,NABLA,CB,CM

C101  FORMAT (6F10.0)

          READ (5,*) NUE

C 103  FORMAT (F10.0)

c      *****NUMBERS OF FN AND DATAS *****

          READ (5,*) M,N

C 104  FORMAT (2I5)

C      **** PARAMETERS OF EACH SECTION
*** HO=B/2O,SIG=S/BO,BX=BREADTH

C          DX-DRAFT

          DO 1 I=1,N

1      READ (5,*) X(I),HO(I),SIG(I),BX(I),DX(I)

C 105  FORMAT (5F10.0)

C  BILGE'S KEELS DATA ** BSK-BREADTH OF BK,
XBK1=X OF B.K. END

C          XBK2=X OF B.K. END(FOR)

          READ (5,*) BBK,XBK1,XBK2

C 106  FORMAT (3F10.0)

5      CONTINUE

C      ***                      CONDITION
***OGD=OG/D,T=PERIOD,THETA=AMP. OF ROLL

          READ (5,*) OGD,T,THETA

C 102  FORMAT (3F10.0)

          IF (T.LT.0.000001) STOP

C      " WAVE MAKING COMPONENT AT FN=O ***

          READ(5,*)BWOSM

          WRITE (6,*) PROJ

C          200                      FORMAT
(1H1,///,7X,5H***** ,2X,70A1,2X,5H***** )

```

```

WRITE (6,300) L,B,D,NABLA,CB,CM
300          FORMAT          (1H
//,5X,8H**DATA**,2X,2HL=,F8.5,2X,2HB=,F8.5,2X,2
HD=
1
,F8.5,2X,6HNABLA=,F12.5,2X,3HCB=,F8.5,2X,3HC
M=,F8.5)
WRITE          (6,301)
OGD,T,THETA,NUE,BWOSM
301          FORMAT          (1H
,5X,5HOG/D=,F8.3,2X,2HT=,F8.3,2X,6HTHETA=,F8.
3,3HRAD
1
,2X,4HNUE=,F12.8,2X,6HBWOSM=,F15.10)
WRITE (6,302) BBK,XBK1,XBK2
302          FORMAT          (1H
,5X,4HBBK=,F8.5,2X,5HXBK1=,F8.3,2X,5HXBK2=,F
8.3)
WRITE (6,304)
304 FORMAT (1H //,4X,25H**DATAS OF EACH
SECTION**)
DO 15 I=1,N
15 WRITE (6,303) X(I),HO(I),SIG(I),BX(I),DX(I)
303          FORMAT(1H
,4X,3HSS=,F8.3,3X,3HHO=,F8.5,3X,6HSIGMA=,F8.
5,3X,2HB=,
1 F8.5,3X,2HD=,F8.5)
C *****
OMEGA=6.28318/T
DO 2 I=1,M
2 FN(I)=0.02*FLOAT(I-1)
CALL          FRICT
(L,B,D,CB,NABLA,OGD,NUE,OMEGA,FN,BFHAT,M)
CALL          WAVE
(L,D,OMEGA,BWOSM,FN,BWHAT,M)
CALL          LIFT
(L,B,D,CM,NABLA,OGD,FN,BLHAT,M)
CALL          EDDY
(X,HO,SIG,BX,DX,B,D,NABLA,OGD,OMEGA,THET
A,FN,
1 BEHAT,M,N,L)
IF (BBK.LT.0.0000000001) GO TO 20
CALL          BK
(X,HO,SIG,BX,DX,B,D,NABLA,OGD,OMEGA,THET
A,BBK,
1 XBK1,XBK2,BBKHAT,M,N,L)
20 IF (BBK.LT.0.0000000001) BBKHAT=0.0
DO 3 I=1,M
3 B44HAT(I)=BFHAT(I)+BWHAT(I)+BLHAT(I)+BEHAT
(I)+BBKHAT
C *****
***
WRITE (6,201)
201          FORMAT          (1H
//,4X,2HFN,6X,5HBFHAT,5X,5HBWHAT,5X,5HBEH
AT,5X,
1
5HBLHAT,5X,6HBBKHAT,4X,2H**,3X,6HBF/B44,4X,
6HBW/B44,
2
4X,6HBE/B44,4X,6HBL/B44,2X,7HBBK/B44,4X,2H**
,2X,
3 6HB44HAT,2X,2H**)
WRITE(*,*)'AQUI'
PAUSE
DO 4 I=1,M
BFF=BFHAT(I)/B44HAT(I)
BWW=BWHAT(I)/B44HAT(I)
BEE=BEHAT(I)/B44HAT(I)
BLL=BLHAT(I)/B44HAT(I)
BBKK=BBKHAT /B44HAT(I)
4 WRITE(6,202)FN(I),BFHAT(I),BWHAT(I),B
EHAT(I),BLHAT(I),BBKHAT,
1
BFF,BWW,BEE,BLL,BBKK,B44HAT(I)

```

```

202          FORMAT          (1H
,2X,F6.3,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,
          1
3X,2H**,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2
X,
          2  2H**,1X,F8.5,1X,2H**)
          GO TO 5
END
C*****
*****
          SUBROUTINE          LIFT
(L,B,D,CM,NABLA,OGD,FN,BLHAT,M)
C      LIFT COMPONENT
C      REF. V.IKEDA EI AL (JZK.NO.143)
          REAL L,NABLA,KAPA,KN,LO,LR
          DIMENSION FN(100),BLHAT(100)
          IF (CM.LE.0.92) KAPA=0.0
          IF          (CM.LE.0.97.AND.CM.GT.0.92)
KAPA=0.1
          IF (CM.GT.0.97) KAPA=0.3
          KN=6.28319*D/L+KAPA*(4.1*B/L-0.045)
          OG=OGD*D
          LO=0.3*D
          LR=0.5*D
          DO 1 I=1,M
          1
BLHAT(I)=L*D*KN*LO*LR*FN(I)*0.5/(NABLA*B**2)*
SQRT(0.5*L*B)*(1.0-
          1  1.4*OG/LR+0.7*OG**2/(LO*LR))
          END
C*****
*****
          SUBROUTINE          WAVE
(L,D,OMEGA,BWOSM,FN,BWHAT,M)
C      WAVE MAKING COMPONENT
c      REF V.IKEDA ET AL. (JZK.NO.243)
          REAL L,LOMEGA
          DIMENSION FN(100),BWHAT(100)
          GUZAID=OMEGA**2*D/9.80665
          A1=1.0+GUZAID**(-1.2)*EXP(-
2.0*GUZAID)
          A2=0.5+GUZAID**(-1.0)*EXP(-
2.0*GUZAID)
          DO 1 I=1,M
          LOMEGA=OMEGA*FN(I)*SQRT(L/9.80665
)
          1  BWHAT(I)=BWOSM*0.5*(((A2+1.0)+(A2-
1.0)*TANH(20.0*(LOMEGA-0.3)))+
          1  (2.0*A1-A2-1.0)*EXP(-
150.0*(LOMEGA-0.25)**2))
          RETURN
          END
C      *****
*****
          SUBROUTINE          FRICT
(L,B,D,CB,NABLA,OGD,NUE,OMEGA,FN,BFHAT,M)
C      FRICTIONAL COMPONENT
C      REF. 1-IKATO (Jk(.NO, 102) AND
S.TAMIYA ET AL. IJZK.NO.132)
          REAL NABLA,NUE,L
          DIMENSION FN(100),BFHAT(100)
          SF=L*(1.7*D+CB*B)
          RF=((0.887+0.145*CB)*(1.7*D+CB*B)-
2.0*OGD*D)/3.145
          DO 1 I=1,M
          C      ////////////////////////////////////////////////////////////////////
//////////////////////////////////////////////////////////////////
          1  BFHAT(I)=0.78*SF*RF**2*SQRT(OMEGA*
NUE*B/19.6133)/(NABLA*B**2)*
          1  (1.0+4.1*FN(I)/OMEGA*SQRT(9.80665/L))
          RETURN
          END

```

```

C *****
C *****
SUBROUTINE EDDY
(X,HO,SIG,BX,DX,B,D,NABLA,OGD,OMEGA,THETA,
A, FN,
1 BEHAT,M,N,L)
C EDDY MAKING COMPONENT
C REF. V, IKEDA ET AL (JZH.NO.142,UZK.NO.143)
REAL NABLA,LTHETA,L
DIMENSION
X(25),HO(25),SIG(25),BX(25),DX(25),FN(100),BEHAT(100),
1
RMAX1(2),V(2),CR(25),CR1(25),X1(30)
DO 1 J=1,N
AHO=HO(J)/(1-OGD)
SIGMA=(SIG(J)-OGD)/(1.0-OGD)
E=(AHO-1)/(AHO+1)
E2=E**2
A=4*SIGMA*(1-E2)/3.1415+E2
O=-A/(A+3)
O2=SQRT(O**2-(A-1)/(A+3))
A3=O+O2
A1=E*(1+A3)
AM=BX(J)/(1+A1+A3)*0.5
AA1=A1*(1+A3)/A3*0.25
IF(AA1.GT.1) AA1=1
IF(AA1.LT.-1) AA1=-1
DO 2 I=1,2
LTHETA=0.5*ACOS(AA1)
IF (I.EQ.1) LTHETA=0
AH=1+A1**2+9*A3**2+2*A1*(1-3*A3)*COS(2*LTHETA)-6*A3*
1 COS(4*LTHETA)
AA=-2*A3*COS(5*LTHETA)+A1*(1-3*A3)*COS(3*LTHETA)+((6-3*
1 A1)*A3**2+(A1**2-3*A1)*A3+A1**2)*COS(LTHETA)
BB=-2*A3*SIN(5*LTHETA)+A1*(1-3*A3)*SIN(3*LTHETA)+((6+3*
1 A1)*A3**2+(3*A1+A1**2)*A3+A1**2)*SIN(LTHETA)
V(I)=2*AM*SQRT(AA**2+BB**2)/AH
2
RMAX1(I)=AM*SQRT(((1+A1)+SIN(LTHETA)-A3*SIN(3*LTHETA))**2
1 A1)*COS(LTHETA)+A3*COS(3*LTHETA))**2)+((1-
RMAX=RMAX1(1)
VMAX=V(1)
IF (RMAX1(1).LE.RMAX1(2)) GO TO 8
GO TO 9
8
RMAX=RMAX1(2)
VMAX=V(2)
9
CONTINUE
RMEAN=2.0*DX(J)*(1.0-OGD)*SQRT(AHO*SIGMA/3.1415)
P1=VMAX/RMEAN
P2=RMAX/RMEAN
PP3=P1+P2
IF (SIGMA.LT.0.99) GO TO 20
GAMMA=(1.0+4.0*EXP(-165000*(1.0-SIGMA)**2))*PP3
GO TO 21
20
GAMMA=PP3
21
CP=0.5*(0.87*EXP(-GAMMA)-4.0*EXP(-0.187*GAMMA)+3.0)
F1=0.5*(1+TANH(20.0*(SIG(J)-0.7)))
F2=0.5*(1-COS(3.1415*SIG(J)))-1.5*(1-EXP(-5*(1-SIG(J))))*
1 SIN(3.1415*SIG(J))**2
R=2*DX(J)*SQRT(HO(J)*(SIG(J)-1)/(-0.8584))
RD=R/DX(J)

```

```

      IF (HO(J).LE.1.AND.RD.GE.AHO)
R=0.5*BX(J)

      IF (HO(J).GT.1.AND.RD.GE.1) R=DX(J)

      RD=R/DX(J)

1      CR1(J)=RMAX**2/DX(J)**2*CP*((1-
F1*RD)*(1-OGD-F1*RD)+F2*
      1 (HO(J)-F1*RD)**2)

      WRITE (6,452)

452 FORMAT (1H ,//,4X,4H****,31HLONGITUDINAL
DISTRIBUTION OF CR,
      1 4H****)

      DO 10 J=1,N

10      WRITE (6,453) X(J),CR1(J)

453 FORMAT (1H ,4X,3HSS=,F8.5,4X,3HCR=,F8.5)

      DO 3 K=1,21

      X1(K)=0.5*FLOAT(K-1)

      MAX=N

3      CALL HOKANI (X,CR1,
25,MAX,X1(K),CR(K),DAM,1,0)

      CR(1)=1.5*(1-OGD)

      CR(21)=1.5*(1-OGD)

      SAM=0

      DO 4 K=1,10

      K2=2*K

      K1=K2-1

      K3=K2+1

      SAM1=CR(K1)+4*CR(K2)+CR(K3)

4      SAM=SAM+SAM1

      CRT=SAM/60

      BEHAT(1)=4*L*D**4/3/3.1415*OMEGA*SQ
RT(B/19.6)/NABLA/B**2*CRT*

      1 THETA

      DO 5 I=2,M

      AK=OMEGA/FN(I)*SQRT(L/9.8)

```

```

5      BEHAT(I)=BEHAT(1)*(0.04*AK)**2/((0.04*AK)**2+1.
0)

      RETURN

      END

C*****
*****

      SUBROUTINE BK
(X,HO,SIG,BX,DX,B,D,NABLA,OGD,OMEGA,THET
A,BBK,
      1 XBK1,XBK2,BKHAT,M,N,L)

C      DAMPING DUE TO BILGE REELS.

C      REF. YIREDA ET AL (KZR.NO.1G1,
KZR.NO. 165)

      REAL
NABLA,M1,M2,M3,M4,M5,M6,M7,M8,L

      DIMENSION
X(25),HO(25),SIG(25),BX(25),DX(25),BBKHAT(25),X
BK(25),
      1 RATIO(25)

      XBK(1)=XBK1

      XBK(11)=XBK2

      DO 1 I=2,10

1      XBK(I)=XBK(I-1)+(XBK2-XBK1)*0.1

      MAX=N

      DO 2 I=1,11

      CALL HOKANI
(X,HO,25,MAX,XBK(I),HO1,DAM,1,0)

      CALL HOKANI
(X,SIG,25,MAX,XBK(I),SIG1,DAM,1,0)

      CALL HOKANI
(X,DX,25,MAX,XBK(I),DX1,DAM,1,0)

      CALL HOKANI
(X,BX,25,MAX,XBK(I),BX1,DAM,1,0)

      R=2*DX1*SQRT(HO1*(SIG1-1)/(-0.8585))

      RD=R/DX1

      IF (HO1.LE.1.AND.RD.GE.HO1)
R=0.5*BX1

```



```

IF (HO1.GT.1.AND.RD.GE.1) R=DX1
RD=R/DX1
F=1.0+0.3*EXP(-160.0*(1.0-SIG1))
RBK=DX1*SQRT((HO1-0.2929*RD)**2+(1.0-OGD-0.2929*RD)**2)
M1=RD
M2=OGD
M3=1.0-M1-M2
M4=HO1-M1
M5=(0.414*HO1+0.0651*M1**2-(0.382*HO1+0.0106)*M1)/((HO1-0.215*
1 M1)*(1-0.215*M1))
M6=(0.414*HO1+0.0651*M1**2-(0.382+0.0106*HO1)*M1)/((HO1-0.215*
1 M1)*(1-0.215*M1))
SO=0.3*(3.1415*F*RBK*THETA)+1.95*BB
K
M7=SO/DX1-0.25*3.1415*M1
R1=0.25*3.1415*R
IF (SO.LT.R1) M7=0.0
M8=M7+0.414*M1
IF (SO.LT.R1) M8=M7+1.414*(1-COS(SO/R))*M1
A=(M3+M4)*M8-M7**2
C+++++
+++++
+++++
BB=M4**3/3/(HO1-0.215*M1)+(1.0-M1)**2*(2.0*M3-M2)/6.0/(1.0-0.215*
1 M1)+M1*(M3*M5+M4*M6)
CPPLAS=1.2
CPMINS=-22.5*BBK/(3.1415*RBK*F*THETA)-1.2
CD=CPPLAS-CPMINS
C *** HAT FOR UNIT LENGTH**
C+++++
+++++
+++++

```

```

RATIO(I)=RBK*BBK*CD/(RBK*BBK*CD+0.5*DX1**2*(-A*CPMINS+BB*CPPLAS))
2
BBKHAT(I)=8*RBK**2*OMEGA*(SQRT(B/19.6))*THETA*F**2/(3*3.1415*
1
NABLA*B**2)*(RBK*BBK*CD+0.5*DX1**2*(-A*CPMINS+BB*CPPLAS))
WRITE (6,100)
100 FORMAT (1H ,//,4H****,35HLONGITUDINAL DISTRIBUTION OF BBKHAT,
1 4H****)
DO 7 I=1,11
7 WRITE (6,101) (6,101)
XBK(I),BBKHAT(I),RATIO(I)
101 FORMAT (1H ,4X,3HSS=,F8.5,3X,7HBBKHAT=,F13.8,3X,22HNORMAL FORCE/
1TOTAL BK=,F13.8)
C ****BKHAT FOR THREE DIMENSIONAL SHIP FORM *****
SAM=0.0
DO 3 I=1,5
I2=2*I
SAM1=BBKHAT(I2-1)+4.0*BBKHAT(I2)+BBKHAT(I2+1)
3 SAM=SAM+SAM1
BKHAT=SAM*(XBK2-XBK1)*0.1/3.0*L*0.1
RETURN
END
C*****
*****
SUBROUTINE HOKANI
(X1,Y1,MAX,N,X,Y,YX,M1,M2)
C LAGRANGE 3 POINTS INTEPLATION
DIMENSION X1(MAX),Y1(MAX),WX(3),WY(3)
N1=N-1

```

	DO 10 I=2,N1	C	*****
	IF (X.LE.X1(I)) GO TO 1		*****
10	CONTINUE		SUBROUTINE LAG3 (WX,WY,X,Y)
1	I1=I-1		DIMENSION WX(3),WY(3)
	IF (X.GT.X1(N1)) I1=N-2		Y=0.0
	I2=I1+2		DO 11 I=1,3
	DO 20 I=I1,I2		W=1.0
	I1=I+1-I1		Z=1.0
	WX(I1)=X1(I)		DO 12 J=1,3
20	WY(I1)=Y1(I)		IF(J.EQ.I) GO TO 12
	IF(M1.NE.1) GO TO 2		W=W*(X-WX(J))
	CALL LAG3(WX,WY,X,Y)		Z=Z*(WX(I)-WX(J))
2	CONTINUE	12	CONTINUE
	IF(M2.NE.1) RETURN		Y=Y+WY(I)*W/Z
	YX=0.0	11	CONTINUE
	RETURN		RETURN
	END		END

ANEXO D

Valores de la función de dispersión de probabilidad, W_i

		<i>Tz, periodo 'zero crossing' [25] [seg]</i>													
		<i>3.5</i>	<i>4.5</i>	<i>5.5</i>	<i>6.5</i>	<i>7.5</i>	<i>8.5</i>	<i>9.5</i>	<i>10.5</i>	<i>11.5</i>	<i>12.5</i>	<i>13.5</i>	<i>14.5</i>	<i>15.5</i>	<i>16.5</i>
<i>Hs, Altura significativa H1/3 [m]</i>	<i>0.5</i>	1.3	133.7	865.6	1186	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0	0	0	0
	<i>1.5</i>	0	29.3	986	4976	7738	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0
	<i>2.5</i>	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
	<i>3.5</i>	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
	<i>4.5</i>	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
	<i>5.5</i>	0	0	1	51	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126	463.6	150.9	41	9.7	2.1
	<i>6.5</i>	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
	<i>7.5</i>	0	0	0	3	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5
	<i>8.5</i>	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
	<i>9.5</i>	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
	<i>10.5</i>	0	0	0	0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4	1.2
	<i>11.5</i>	0	0	0	0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7
	<i>12.5</i>	0	0	0	0	0.1	1	4.4	9.9	12.8	11	6.8	3.3	1.3	0.4
	<i>13.5</i>	0	0	0	0	0	0.3	1.4	3.5	5	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2
	<i>14.5</i>	0	0	0	0	0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1
	<i>15.5</i>	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1
<i>16.5</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0	

ANEXO E

Publicación asociada con el proyecto de graduación con la revisión del editorial SPRINGER y el comité científico de XXV COPINAVAL organizado por IPIN, Panamá 2017

Analysis of the possible risk of capsizing in a 45-meter fishing tuna vessel that has been elongated in the middle section.

Oscar E. Viteri¹[0000-0002-1269-4607] and Franklin J. Dominguez¹[0000-0003-3969-8701]

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador

oeviteri@espol.edu.ec
jodoming@espol.edu.ec

Summary. The increased distance of tuna fishing grounds necessitates the fishing industry to seek the best use of existing fishing vessels. This project begins with a 36-meter sardine vessel and converts it into a fishing tuna vessel with an insulated storage space.

Once the new main dimensions have been calculated, an intact stability analysis is conducted according to the International Maritime Organization's (IMO) criteria for this type of vessel.

Subsequently, a simulation to evaluate the hazard criteria of a parametric roll is performed. Hereby, the matching period of roll and period of encounter, the areas of instability p and q , and Dunwoody's critical height are evaluated. Then, a comprehensive calculation is made by applying the methodology proposed by Themelis, Nikos, Spyrou, and Kostas (2007) as well as by adding a water shipping component to the general roll equation.

Finally, to analyze the possible risk of loss (capsizing) based on a confidence interval of at least 86.5%, corresponding to a significant $[H_s]$, an analysis of the critical wave height at each node, as proposed by Dunwoody (1989), is carried out.

Keywords: Capsizing, Parametric Roll, Water on Deck.

1 Introduction

The analysis of the possible risk of capsizing, as explored in this paper, focuses on establishing a set of vulnerability criteria that enable an easy application for fishing tuna vessels. In this case, the risk criteria will be applied to a case study of a 36 [m] sardine vessel that has been lengthened to 45 [m].

The first part of this study carries out the dimensional studies and the respective optimization based on a genetic algorithm to define the main dimensions listed in Table 1 [1].

Table 1. Primary vessel data

Length, L	[M]	45.10
Length between PP, LPP	[M]	38.48
Beam (B)	[M]	7.92
Depth (P)	[M]	4.75
Draught (H)	[M]	4.38
Displacement, Δ	[Ton]	803.30
Block coefficient, C_B	[-]	0.56
Ship speed, V_b	[Knots]	10.50
GM_T in calm water	[M]	0.57
Period of roll, T_{roll} to calm	[Sec]	0836
GM_r	[M]	34.32
Pitch period, T_{pitch}	[Sec]	9.91

The case study will consist of the following analysis process:

- Noting the navigation route, both departure and return.
- Identifying equidistant nodes from the port to the fishing area, and vice versa, using weather forecasts.
- Making oceanographic calculations of spectral densities and solving RAO to estimate the average heights, $H_{1/3}$, H , $H_{1/100}$.

The risk criteria will be applied as follows:

- 1.- Criterion for possible matches [2]
- 2.- Criterion for areas of instability (p, q) [3]
- 3.- Critical height criterion [4] and [5]

1.1 State of the Art

The number of capsizing incidents has given rise to much research on this type of disaster. The IMO [6], [18] has identified the following phenomena as factors in capsizing:

- 1.- Pure loss of stability
- 2.- Parametric roll
- 3.- Surf-riding/broaching
- 4.- Dead ship
- 5.- Excessive accelerations

The IMO further provides captain recommendations on how to avoid the resonant movements that can lead to capsizing.

This research draws upon the related studies by Belenky [7], Dunwoody [4] and [5] Garvaky [8], Himeno [9], and ABS [10] and takes their findings into consideration. These works have contributed to the mathematical description of the parametric resonance phenomenon. The present study aims to establish the hazard criteria for para-

metric resonance in such a way that critical weather conditions leading to roll resonance can be identified in the design stage as well as during ship operations.

1.2 Literature Review

Probability of Wave Occurrence. Short-term irregular sea conditions can be described using the spectral density function. The sea spectra are in line with statistical distribution. Rayleigh's [11] function is used to calculate the probable density of a particular wave.

$$p(H_i) = \frac{2 \cdot H_i}{\bar{H}^2} e^{-2H_i/\bar{H}} \quad (1)$$

Roll Damping. Roll damping [B_{44e}] is an essential characteristic in the parametric balance phenomenon. Roll damping is heavily affected by viscous effects and ship speed.

A model with a unique degree of freedom that describes the movement of a roll of a vessel is shown in equation (2):

$$A_\varphi \cdot \ddot{\varphi} + B_\varphi \cdot \dot{\varphi} + C_\varphi \cdot \varphi = M_\varphi(\omega \cdot t) \quad (2)$$

The term [B_{44e}] can be obtained by a combination of the linear and non-linear components, using equation (3), which was proposed by the ITTC [12].

$$B_{44e} = B_{\varphi e} = B_{\varphi 1} + \frac{8}{3\pi} \omega_e \cdot \varphi_a \cdot B_{\varphi 2} \quad (3)$$

Wave Spectrum, DNV Formulation. Steady sea conditions are characterized by a set of environmental parameters: significant wave height H_s , spectral peak period T_p , bathymetry, and wind direction. DNV's sea spectrum formulation has been used, taking the meteorological data of operation as a base. The peak increase factor [γ] used by DNV is determined by the significant wave height and the period modal [13], and is given in equation (4).

$$S_{DNV\zeta}(\omega_w) = \alpha \cdot \omega_w^{-5} \cdot \exp(-\beta \cdot \omega_w^{-4}) \cdot \gamma \left(\frac{-1}{2\sigma^2} \left(\frac{\omega}{\omega_p} - 1 \right) \right)^2 \quad (4)$$

2 Risk Criteria

To analyze the risk of capsizing, the four main criteria of wave height, namely average waves H_{prom} and significant waves $H_{1/3}$, $H_{1/10d}$, and $H_{1/100}$, are important. To analyze the resonance in the roll, the following criteria are proposed.

2.1 Criterion for Possible Matches

The natural roll at each of the following conditions is equal to:

$$T_\varphi \approx \frac{2}{n} \cdot T_e, \text{ where } n=1,2, \dots \quad (6)$$

The length of wave, λ_ω , should be within a range of: (0.8L - 1.2L).

2.2 Criterion for Areas of Instability (p, q) – Damped

A second risk criterion is proposed to evaluate the dimensionless parameters p and q in the graph "Ince-Strutt-damped", which is a graphic solution of the differential equation by Mathieu [3]. To obtain a real approximation of p and q , shipping of water at the height of the metacentric calculation (GMt) must be taken into consideration. The parameters p and q are part of Mathieu's equation (7), defined in equation (8) as:

$$\frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} + \mu \frac{d\varphi}{d\tau} + (p + q \cdot \cos(\tau)) \cdot \varphi = 0 \quad (7)$$

$$p = \left(\frac{\omega_m}{\omega_e} \right)^2 - \mu^2 \quad q = \left(\frac{\omega_a}{\omega_e} \right)^2 \quad (8)$$

$$\omega_m = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM_m}{I_{xx} + A_{44}}} \quad \omega_a = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM_a}{I_{xx} + A_{44}}} \quad \mu = \frac{B_{44e}}{(I_{xx} + A_{44}) \cdot \omega_e}$$

$$GM_m = 0.5 \cdot (GM_{\max} + GM_{\min}) \quad GM_a = 0.5 \cdot (GM_{\max} - GM_{\min})$$

Where I_{xx} is inertia, A_{44} is added inertia, and GM_m and GM_a are the mean value and the range of variation of GM in waves, respectively.

2.3 Dunwoody's Critical Height Criterion

This criterion evaluates "the critical level of wave height" according to Dunwoody's procedure [4]. This approach proposes that the fluctuations of GM_t can be expressed as a function of the spectral density, $s_{e\zeta}$, the frequency of encounter, ω_e , and the response (GMa/ζ_{10}) evaluated in the frequency of encounter.

From the spectrum of response formula, the critical height of a wave, $2*\zeta$ (equation 9) can be obtained, thus fulfilling the condition of reducing the dimensionless damping $\Delta\xi$ (equation 10).

$$S_{GMt} = \left(\frac{GM_a}{\zeta_a} \right)^2 \cdot S_{e\xi}(\omega_\phi) \Rightarrow \zeta_a = GM_a \cdot \left(\frac{S_{GMt}}{S_{e\xi}(\omega_\phi)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$\frac{B_{total}}{B_{crit}} - \Delta\xi \leq 0 \quad (10)$$

$$\Delta\xi = \frac{\pi \cdot g^2 \cdot S_{GMt}}{4 \cdot \omega_\phi^3 \cdot k_{xx}^4}$$

Where $B_{total}=B_{44e}$, is the damping coefficient, B_{crit} is the critical damping coefficient (equation 11), ω_ϕ is a ship's natural roll frequency, and k_{xx} is the virtual turning radius.

$$B_{crit} = 2 \cdot \sqrt{(A_{xx} + I_{xx}) \cdot \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM} \quad (11)$$

To link the period of significant wave height in each node, Wiegel's [14] relationship is used:

$$H_s = k_1 \cdot \bar{T}^{K_2} \quad (12)$$

Returning DNV's wave spectrum (equation 4), it is possible to leave the significant wave height spectrum and find the height of the critical wave.

3 Case Study

3.1 Route

The route Manta–fishing grounds–Manta was chosen. It is described by nodes, as shown in Fig. 1. The full length of the journey was estimated at 1218 nautical miles with an average speed of 10.5 knots. To simplify calculations, only the maximum displacement condition has been considered. The weather conditions are displayed in Table 2 for the half length of the journey.

Table 2. An example from the port to the fishing grounds, ECMWF data [16].

	<i>Node 01</i>	<i>Node 02</i>	<i>Node 03</i>	<i>Node 04</i>	<i>Node 05</i>
Latitude	0°46'38.27"S	0°16'4.94"N	1°34'8.16"N	3°15'51.56"N	2°51'53.74"N
Length	80°47'6.91"W	83°16'45.49"W	85°34'22.78"W	87°39'24.27"W	90°36'36.76"W
Wave height [m]	1.1	2.2	2.1	2.2	2.4
Wave period [1/s]	9	9	8	9	10
Encounter angle	81	55	32	98	86

Bathymetry [m]	500	3000	3000	2000	2000
----------------	-----	------	------	------	------

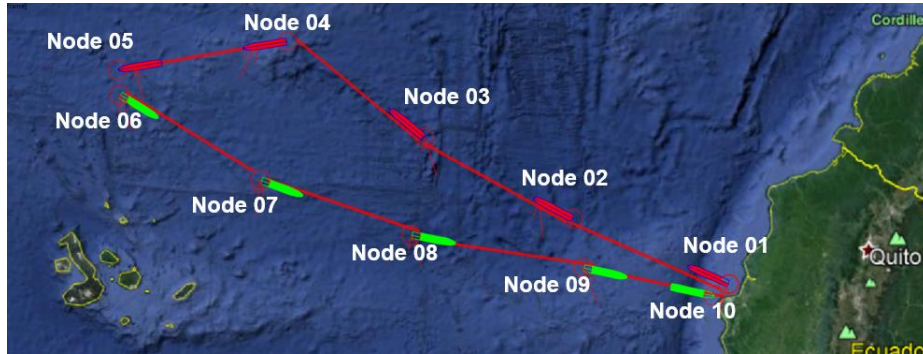


Fig. 1. Outline of the nodes selections used in this study by Google Earth Pro [15].

4 Results

4.1 Coefficient Calculations of the Roll Equation

This study has obtained the value of added inertia $[A_{44}]$ of 2310.5 $[\text{ton}\cdot\text{m}^2]$ through the calculation based on the mapping by Lewis [17], and a moment of inertia $[I_{XX}]$ of 8434.2 $[\text{ton}\cdot\text{m}^2]$. The values of the damper B_{44e} vary as a function of speed, the period of the wave, the shape of the ship, and the encounter angle of each node.

4.2 Metacentric Height, GM in Waves

A ship's stability in waves has been evaluated from various crest positions along the length and at different heights at each node. We have thus obtained the metacentric minimum and maximum heights of each iteration.

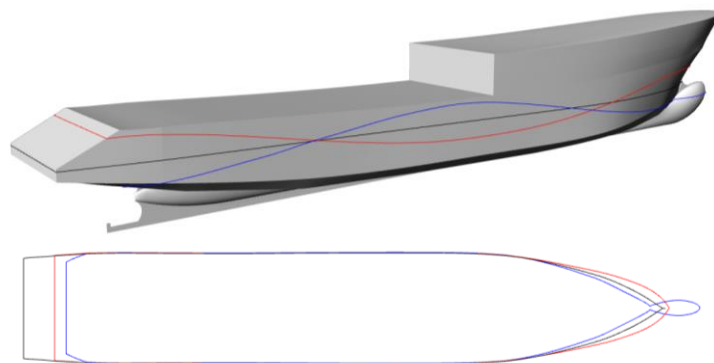


Fig. 2. Waterplane variation depends on the position of the crest, $H_s = 2.2 [m]$

Fig. 2 shows the float variation depending on the position of the wave in the hogging and sagging of the ship. A group of waves that continuously generate this effect can eventually cause a ship to capsize.

Fig. 3 shows an example calculation of a significant wave height of 2.4 [m] and varies the length of the wave to determine GM's greatest point of variation in the waves. The wave length selected for this calculation is $\lambda = 1.0L$. This parameter is used by the criterion to determine whether the failure mode can cause instability.

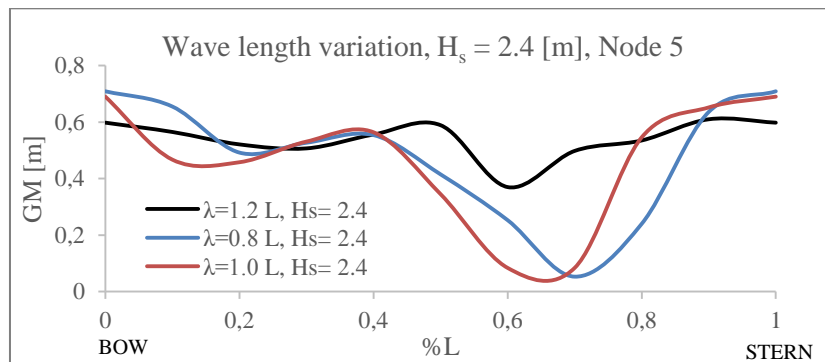


Fig. 3. GMt for different positions of the crest along the vessel. $H_s = 2.4$ [m]

4.3 Possible Criteria Matches (Criterion 1)

Table 3 presents the evaluation of criterion 1 at corresponding significant heights. Sailing under unstable conditions increases the possibility of capsizing. The area of instability has been marked with the letter “I” and the area of stability has been given the letter “E”.

Table 3. Summary of criterion 1 results

	Λ - Deep Water [m]		Te [sec]	Tφ [sec]		Criterion I
	Value	Crit.				
Node 01	126.47	E	0957	8.71	E	E
Node 02	126.47	E	11.54	14.59	E	E
Node 03	99.92	E	12.63	13.79	E	E
Node 04	126.47	E	8.25	14.59	E	E
Node 05	156.13	E	10.25	16.30	E	E
Node 06	156.13	E	7.91	16.30	I	I
Node 07	156.13	E	9.33	12.34	E	E
Node 08	126.47	E	7.63	13.79	I	I
Node 09	56.21	E	4.61	8.70	E	E
Node 10	56.21	E	4.97	8.68	E	E

4.4 Criterion for Areas of Instability (p, q) - Damped (Criterion 2)

As a calculation example, Table 4 shows the values obtained for node 4, from the port to the fishing grounds, with $\mu = 0.084$ being the non-dimensional damper for this node. Figure 4 shows the obtained values.

Table 4. Results of criterion 2 at node 4.

	φ [°]	P_e	H_ω [m]	KG fluido [m]	GM_a [m]	GM_m [m]	ω_m [$\frac{rad}{s}$]	ω_a [$\frac{rad}{s}$]	$\hat{\omega}_m$	$\hat{\omega}_a$	p	q
<i>ave.</i>	4.62	0.45	1.37	3.54	0.02	0.55	0.64	0.13	0.88	0.18	0.76	0.03
1/3	7.38	0.14	2.19	3.54	0.21	0.40	0.55	0.40	0.75	0.55	0.55	0.3
1/10	9.37	0.04	2.80	3.54	0.29	0.37	0.53	0.47	0.72	0.64	0.51	0.40
1/100	12.31	0.00	3.67	3.54	0.33	0.27	0.45	0.50	0.62	0.68	0.37	0.46

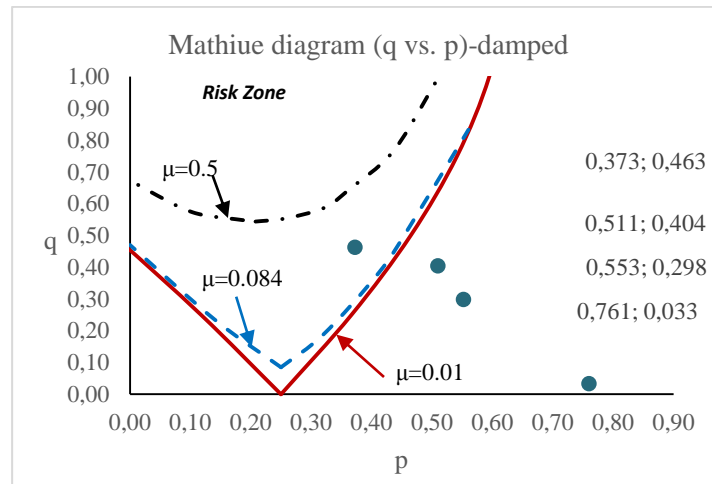


Fig. 4. Ince-Strutt diagram damped with the results of node 4.

4.5 Dunwoody's Critical Height Criterion (Criterion 3)

Table 5 summarizes the critical height calculations for each node and their respective GM variations, spectrum density, and angle of encounter.

Table 5. Results of criterion 3 for each node considering FN=0.0 (without speed).

Node	H_s - nodal [m]	Ψ [deg]	GM_a [m]	B_{44e} , FN=0 [ton*m ² /seg]	H_{crit} , FN=0 [m]	Criterion FN=0
1	1.10	81	0.54	380.68	2.52	E
2	2.20	55	0.40	371.47	3.23	E
3	2.10	32	0.41	367.63	4.21	E
4	2.20	98	0.40	387.20	2.22	E
5	2.40	86	0.39	377.14	2.44	E

6	2.20	140	0.40	392.08	1.84	I
7	1.90	102	0.43	382.10	2.19	E
8	2.10	118	0.41	394.49	1.98	I
9	1.10	125	0.54	441.35	1.82	E
10	0.90	111	0.54	430.66	1.96	E

Table 6 below shows a comparison of each of the risk criteria for the corresponding H_s of each node.

Table 6. Results of the three criteria evaluated at each node, with their respective H_s .

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Criterion 1: Possible matches	E	E	E	E	E	I	E	I	E	E
Criterion 2: Areas of instability (p, q)	E	E	E	E	E	I	E	I	E	E
Criterion 3: Dunwoody's critical height, FN=0	E	E	E	E	E	I	E	I	E	E

5 Discussion

The study of parametric resonance largely follows the stability calculation based on the influence of waves, the damping ratio calculation, and the possibility of shipping of water, all of which contribute in some way to the risk of capsizing.

The case study found instability at nodes 6 and 8 at their respective significant heights; node 6 is located in the fishing grounding, which forces the vessel to operate at different speeds and different angles of encounter.

6 Conclusions

1. Nodes 6 and 8 are unstable for all of the proposed criteria.
2. The dimensionless values of p and q (damping included and with correcting for speed) tend to enter the zone of instability when the GMt variation and wave height increase.
3. The results for criterion 3 took into consideration the damping ratio and did not correct for speed.
4. This study's calculations have been based on significant height, with a probability of wave height exceeding 13.7%.

From the research, criterion 2 can be found to be at a probability of 86.3%. Criterion 2 shows the areas of instability p and q (damped), allowing the capsizing risk to be estimated for any wave height.

7 Recommendations for future work

1. Future studies should take into consideration the effect of the variation of the damping coefficient of roll and perform the analysis for extreme conditions.

2. Future research could also analyze the speed variation and make polar charts depending on the direction and height of the wave, whereby parametric roll risk areas could be clearly defined.

References

1. Dominguez, F., Viteri, O.: Lengthening Optimization Module. ESPOL, Guayaquil (2016).
2. Levadou M., Guithem, G.: Operational guidance to avoid parametric roll. Maritime Research Institute Netherlands (2002).
3. Belenky, V., Bassler, C., Spyrou, J.: Development of Second Generation Intact Stability Criteria. Vols. NSWCCD-50-TR, no. 065 (2011).
4. Dunwoody B.: Roll of a ship in Astern Seas - Metacentric Height Spectra. *Journal of Ship Research* 33(3) (1989).
5. Dunwoody B.: Ship in Astern Seas - Response to GM Fluctuations. *Journal of Ship Research* 33(4) (1989).
6. IMO: MSC. 267(65) Código Internacional de estabilidad sin avería. Código IS (2008).
7. Belenky V., Sevastianov N.: *Stability and Safety of Ship: Risk of Capsizing*. Jersey City: SNAME (2007).
8. Garkavy, V.: Deterministic chaos in the task of roll motion ship with a small freeboard. *HADMAR: International Symposium on Hydro and Aerodynamics in Marine Engineering* 2(49) (1991).
9. Himeno, Y.: *Prediction of Ship Roll Damping*. Report of Department of Naval Architecture and Marine Engineering. No. 239. University of Michigan (1981).
10. ABS: *Assessment of parametric roll resonance in the design of container carriers* (2004).
11. Bhattacharyya, R.: *Dynamics of Marine Vehicles*. John Wiley & Sons, Inc (1978).
12. *International Towing Tank Conference: Numerical Estimation of Roll Damping* (2011).
13. DNV: *Modelling and Analysis of Marine Operations*. DNV-RP-H103 (2011).
14. Wiegel, R.: *Oceanographic Engineering*. Prentice Hall, Englewoods Cliffs (1964).
15. Themelis N., Spyrou J.: *Probabilistic Assessment of Ship Stability*. *Transactions - SNAME* (2007).
16. Wind, P.: Forecast, 11 July 2017. [Online]. Available: <https://www.predictwind.com/>.
17. Lewandowski, E.: *The dynamics of Marine Craft. Maneuvering and Seakeeping*, Washington DC: Advance Series on Ocean Engineering (2004).
18. Juana Gamo, J.: *Fenómenos Dinámicos de Estabilidad de un Buque en olas Longitudinales: Resonancia Paramétrica*. ETSIN (2015).