



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

“ANÁLISIS DEL CONFORT DE LOS PASAJEROS EN UN
CATAMARAN DE SERVICIO TURÍSTICO DE 28 M DE ESLORA
DE DISEÑO NACIONAL”

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

ROSA GENESIS DESIDERIO ARRIAGA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios por bendecirme con salud para obtener mis logros. A mis amados padres Ramiro y Felicita por su apoyo incondicional y mostrarme el camino a la superación. A mi hermano Ramiro por permitirme aprender más de la vida a su lado. A mi tutor José R. Marín López por la formación brindada en el inicio de mi vida profesional y la realización de este proyecto. Al Ing. Roberto Morante por habernos proporcionado los datos necesarios para la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

A mis cuatro ángeles que desde el cielo me cuidan mis madres Adalidades, Gloria y Grecia ,y, mi padre Enrique. Por haberme querido como una hija, haberme inculcado el amor al prójimo y ser mi motivación más grande para terminar con éxito este proyecto.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

José R. Marín López

PROFESOR EVALUADOR

Nadia R. Muñoz Agila

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me(nos) corresponde exclusivamente; y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOC 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"

.....
Rosa Genesis Desiderio Arriaga

RESUMEN

En este trabajo se evalúa el confort de los pasajeros a bordo del catamarán Galaxy II de 28 m de diseño nacional, construido con poliéster reforzado con fibra de vidrio que opera en las Islas Galápagos. Para ello se calcula la respuesta del buque en mar irregular aplicando la teoría de fajas. En el desarrollo de este proyecto, se consideran las condiciones de carga propias del buque, diferentes posiciones de análisis y estados de mar 3 y 4, típicos de la región con direcciones de olas desde 0 a 180 grados.

Para evaluar el confort de los pasajeros a bordo del catamarán se deben considerar dos parámetros: la frecuencia de impacto ente las olas y la estructura de conexión de los semicascos ,y, el malestar por movimiento debido a las olas. Para evaluar la frecuencia de impacto, se calcula el espectro de la respuesta en mar irregular del movimiento relativo y la velocidad relativa entre la superficie de la ola y el buque. A partir de la función densidad probabilística se obtiene la probabilidad de que el movimiento y la velocidad relativa excedan cierto valor crítico para que ocurra un golpe hidrodinámico. Multiplicando el periodo entre máximos sucesivos y la probabilidad de ocurrencia de un golpe hidrodinámico, se obtiene finalmente, la frecuencia de impacto en la estructura de conexión.

El malestar por movimiento debido a las olas se evalúa mediante dos parámetros, las normas ISO 2631-1 y el factor MSI del profesor O'Hanlon. Las normas ISO 2631-1 establecen límites para el valor RMS de la aceleración para cierto rango de frecuencias y diferente tiempo de exposición a movimientos estacionarios para el 10 % de pasajeros que se marean a bordo. Mientras que el factor MSI mide el porcentaje de pasajeros que se marean a bordo luego de dos horas expuestos a movimientos estacionarios. Evaluando estos dos parámetros con los resultados obtenidos, se asume que para las condiciones de análisis en estado de mar 4 existe un elevado malestar por movimiento, mientras que para el estado de mar 3 estos valores se reducen considerablemente.

Finalmente, se analiza la influencia de adaptar un bulbo de proa sobre la respuesta de la embarcación y en el confort de los pasajeros, bajo las mismas condiciones de análisis presentadas para el modelo sin bulbo. Obteniendo que la frecuencia de impacto en la estructura de conexión se reduce considerablemente, mientras que el índice de malestar por movimiento de los pasajeros se reduce ligeramente.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	5
1. RESPUESTA DEL BUQUE EN MAR IRREGULAR	5
1.1 Descripción del buque.....	5
1.2 Condiciones de análisis	10
1.3 Respuesta del buque en olas regulares.....	19
1.4 Espectros de las respuestas	24
CAPÍTULO 2.....	30
2. FRECUENCIA DE IMPACTO EN LA ESTRUCTURA DE CONEXIÓN DE LOS SEMICASCOS.....	30
2.1 Densidad probabilística del movimiento relativo proa – ola	31
2.2 Densidad probabilística de la velocidad relativa estructura de conexión – superficie de la ola	34
2.3 Discusión de resultados	38
CAPÍTULO 3.....	40
3. Evaluación del confort de los pasajeros por índice de malestar por movimiento.....	40
3.1 Oscilación inducida por olas – ISO 2631-1	40
3.2 Cálculo de la aceleración vertical RMS.....	44
3.3 Evaluación del confort de los pasajeros con los criterios ISO 2631-1.	49
3.4 Evaluación del confort con los pasajeros por índice de malestar por movimiento.....	52

CAPÍTULO 4.....	55
4. Influencia del bulbo de proa en el confort de los pasajeros.....	55
4.1 Definición de formas con bulbo.....	55
4.2 Densidad probabilística de los parámetros de respuesta.....	57
4.3 Comparación de resultados del modelo con y sin bulbo.....	62
Discusión de resultados.....	66
CONCLUSIONES.....	63
RECOMENDACIONES.....	65
BIBLIOGRAFIA.....	66
ANEXOS.....	68
ANEXO 1.....	69
Cálculos Hidrostáticos.....	69
Hydrostatics catamaran sin bulbo.....	69
Hydrostatics – catamaran con bulbo.....	71
Anexo 2.....	73
RAO's de levantamiento ($\beta=150^\circ; 120^\circ; 60^\circ; 30^\circ; 0^\circ$).....	73
RAO's de balance ($\beta=150^\circ; 120^\circ; 60^\circ; 30^\circ; 0^\circ$).....	75
RAO's de cabeceo ($\beta=150^\circ; 120^\circ; 60^\circ; 30^\circ; 0^\circ$).....	77
Anexo 3.....	79
Valor RMS de la aceleración.....	79
Anexo 4.....	88
Guía del uso de Maxsurf Motion.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Plano de Líneas de formas catamarán Galaxy.....	7
Figura 1.2: Plano de distribución del catamarán Galaxy II.	8
Figura 1.3: Modelado 3D del catamarán.	9
Figura 1.4: Convención de signos.....	10
Figura 1.5: Posiciones de análisis en la vista de planta.	15
Figura 1.6: Ubicación de las posiciones de análisis vista de perfil.	16
Figura 1.7: Definición del ángulo de encuentro β	16
Figura 1.8: Alturas significativas para los diferentes estados de mar.	18
Figura 1.9. Estado de mar de las Islas Galápagos.....	18
Figura 1.10: RAO de levantamiento con direcciones de ola de 180 y 90 grados.....	19
Figura 1.11: RAO de balance con olas de costado.	20
Figura 1.12: RAO's de cabeceo con dirección de ola de 180 y 90 grados	21
Figura 1.13: Punto más bajo del cuerpo de conexión entre semicascos.	22
Figura 1.14. Movimiento relativo proa - ola.	23
Figura 1.15: Amplitudes del movimiento relativo proa - ola.....	24
Figura 1.16: Espectros para estados de mar 3 y 4.....	26
Figura 1.17: Espectro del movimiento relativo entre el punto de análisis - ola.	27
Figura 1.18: Espectro de la velocidad relativa en la estructura de conexión.	28
Figura 1.19: Espectro de la aceleración absoluta para estado de mar 3 y 4.	29
Figura 2.1: Geometría de la estructura transversal en el punto de análisis	36
Figura 2.2: Frecuencia de impacto en la estructura de conexión de los semicascos en función de la velocidad crítica.	39
Figura 3.1: Límites de evaluación de la aceleración vertical para diferentes tiempos de exposición de los pasajeros en el mar.	43
Figura 3.2: Aceleración RMS para el punto de análisis 1.	44
Figura 3.3: Aceleración RMS para los puntos de análisis 2, 3, 4 y 5.	44
Figura 3.4: Aceleración RMS para los puntos de análisis 6, 7, 8 y 9.	45
Figura 3.5: Aceleración RMS para el punto de análisis 10.	46

Figura 3.6: Aceleración RMS para estado de mar 4 con direcciones de olas entre 90 y 180 grados condición 2 velocidad 10 nudos.....	47
Figura 3.7: Aceleración RMS para estado de mar 3 con direcciones de olas entre 90 y 180 grados para la condición 2 velocidad 10 nudos.....	48
Figura 3.8: Evaluación de la Norma ISO 2631-1 para olas de proa condición 2 velocidad 10 nudos.....	50
Figura 3.9: Evaluación de la Norma ISO 2631-1 para olas de costado condición 2 velocidad 10 nudos.....	51
Figura 3.10: Índice de malestar por movimiento para olas de proa, punto 2.	53
Figura 4.1: Sección transversal del modelo con bulbo y sin bulbo.	55
Figura 4.2: Modelo 3D del catamarán con bulbo.....	56
Figura 4.3: Espectro de la velocidad relativa para olas de proa.	60
Figura 4.4: Valor RMS de la aceleración vertical para la condición de carga dos (Máxima carga) con olas de proa.....	62
Figura 4.5: Valor RMS de la aceleración vertical para la condición de carga uno (Llegada a puerto) con olas de proa.	63
Figura 4.6: Porcentaje de personas que se marean a bordo para el modelo con y sin bulbo.....	65
Figura 0.1: Posición del semicasco del catamarán.	88
Figura 0.2: Exportar el modelo en formato IGES.....	89
Figura 0.3: Guardar formas del catamarán en formato IGES extensión Maxsurf.....	89
Figura 0.4: Importar el modelo hacia Maxsurf	90
Figura 0.5: Aplicar simetría al modelo.....	90
Figura 0.6: Parámetros de diseño.....	91
Figura 0.7: Espaciamiento entre semicascos.....	91
Figura 0.8: Guardar el modelo en formato msd.....	92
Figura 0.9: Abrir el modelo en formato msd.	92
Figura 0.10: Selección del método de análisis.	93
Figura 0.11: Ingreso del calado del catamarán para la condición de análisis.....	93
Figura 0.12: Measure Hull del catamarán	94
Figura 0.13: Selección del tipo de buque.	94
Figura 0.14: Distribución de masas del catamarán	95

Figura 0.15: Coeficientes de amortiguamiento.....	95
Figura 0.16: Posiciones de análisis.....	96
Figura 0.17: Ubicación de los puntos de análisis en el modelo.	96
Figura 0.18: Velocidades de análisis.....	97
Figura 0.19: Direcciones de olas respecto al buque.....	97
Figura 0.20: Espectro de mar ITTC dos parámetros.	98
Figura 0.21: Solución de análisis de seakeeping.	99
Figura 0.22: Resultados en forma tabular para cada condición de análisis.....	99
Figura 0.23: Graficación de resultados.	101
Figura 0.24: Selección de opciones a graficar.	101
Figura 0.25: Selección del tipo de gráfico.	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Dimensiones principales del catamarán, (Morante, 2015).....	5
Tabla 1.2: Condiciones de carga del catamarán.....	11
Tabla 1.3: Frecuencias naturales del sistema acoplado.....	12
Tabla 1.4: Frecuencia de balance.....	14
Tabla 1.5: Puntos de análisis en el catamarán Galaxy II (medidos desde sección media).....	14
Tabla 1.6: Altura significativa de las olas en la zona de Galápagos.....	17
Tabla 1.7: Altura significativa y período modal para los estados de mar analizados.....	25
Tabla 2.1: Momentos del espectro de respuesta del movimiento relativo buque /superficie ola.....	32
Tabla 2.2.-Probabilidad de que la superficie de la ola alcance la estructura de conexión entre los semicascos.....	33
Tabla 2.3: Número de veces por hora que la superficie de la ola sobrepasa el punto de análisis.....	34
Tabla 2.4: Momento del Espectro de Respuesta de la Velocidad Relativa.....	36
Tabla 2.5: Probabilidad de exceder la velocidad crítica ($\mu=10.17$ m/s).....	37
Tabla 2.6: Probabilidad de impacto en el punto de análisis ($\mu=10.17$ m/s).....	38
Tabla 2.7: Criterios límites de la frecuencia de impacto.....	38
Tabla 3.1: Guía para la aplicación de las curvas de frecuencia ponderada.....	41
Tabla 4.1: Geometría del bulbo de proa.....	55
Tabla 4.2: Condiciones de carga del catamarán con bulbo.....	56
Tabla 4.3: Espectro del movimiento relativo para olas de proa.....	57
Tabla 4.4: Momento del espectro de respuesta del movimiento relativo.....	58
Tabla 4.5: Número de veces por hora que la superficie de la ola sobrepasa el punto de análisis.....	59
Tabla 4.6: Momentos espectrales de la velocidad relativa.....	61
Tabla 4.7: Probabilidad de impacto en el punto de análisis para olas de proa.....	61

Tabla 4.8: Frecuencia de impacto en la estructura de conexión del modelo con y sin bulbo.....	62
Tabla 0.1: Espectros de mar empleados en el software Maxsurf Motion.....	98

INTRODUCCIÓN

En las islas Galápagos, las embarcaciones con múltiples cascos se están usando mucho últimamente para servicios turísticos. Estos buques tienen gran espacio de habitabilidad por la elevada área de cubierta disponible al separar los cascos. Además, la separación entre los cascos hace que la inercia del plano de flotación aumente, obteniendo como resultado una elevada altura metacéntrica inicial mejorando su estabilidad estática. Sin embargo, no se han desarrollado estudios sobre el confort de los pasajeros a bordo de catamarán turístico que opera en mares irregulares de las Islas Galápagos.

El confort es uno de los aspectos más importantes en la operación de un buque de pasajeros. Uno de los parámetros para juzgar el desconfort es el índice de malestar por movimiento MSI, (con sus siglas en inglés Motion Sickness Index), el cual mide el porcentaje de pasajeros que se marean después de estar expuestos a un número de horas de movimientos. Este parámetro depende de la aceleración vertical combinada con los diferentes movimientos del buque. En el caso de un catamarán, la probabilidad de mareo se espera que sea menor al de un monocasco de tamaño similar operando a la misma velocidad y estado de mar (Piscopo & Scamardella, 2014). Por ende, sería recomendable evaluar el confort de los pasajeros en una embarcación que opera en las condiciones de mar de las Islas Galápagos.

Para evaluar la respuesta dinámica de buques multicascos en mar irregular se puede utilizar primero la teoría de fajas para calcular las propiedades hidrodinámicas del casco y resolver la respuesta lineal en olas regulares. Cada región marítima posee condiciones de mar típica, influenciada por la velocidad del viento y la convergencia de varias corrientes. Todo esto se debe implementar, para obtener la respuesta de los movimientos del buque que permitan la evaluación del confort de los pasajeros en las condiciones propias de las islas Galápagos.

El confort de los pasajeros en un buque puede evaluarse aplicando las normas ISO 2631-1 (International Organization for Standardization 2631 - 1, 2004). Esta norma establece ciertos criterios que permiten evaluar los niveles máximos de vibración, los cuales interfieren en el confort de los pasajeros a bordo. Dichos niveles de vibración se expresan en términos del valor RMS¹ de la aceleración vertical, para rangos de frecuencia entre 0.5 a 80 Hz en un determinado tiempo de exposición a movimiento estacionario. Los niveles de vibración son inducidos tanto mecánicamente como por el movimiento del mar.

El comportamiento dinámico en catamaranes de rápido desplazamiento ha sido analizado en canales de pruebas de algunos centros de investigación. Estos análisis fueron desarrollados en función de la relación s/l (separación entre semicascos/ eslora del buque) para valores entre 0.2 y 0.4, y, con número de Froude entre 0.60 y 0.80 (J, P, & A, 1999). Algunos de estos análisis han sido realizados con olas de costado (120° - 150°) para una gama de catamaranes basados en una geometría típica tales como Swath, Round Bilge, Single Chine. En el presente trabajo se va a realizar el análisis de un catamarán con relación s/l de 0.15, número de Froude entre 0.30 y 0.40, y con dirección de ola desde proa hacia popa en condiciones de mar característico a las Islas Galápagos. Considerando que las condiciones de análisis son diferentes a las ya mencionadas, se puede justificar el desarrollo de este proyecto.

¹ Del inglés Root Mean Square

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la comodidad de los pasajeros en un catamarán de servicio turístico en las Islas Galápagos usando el espectro de su respuesta en mares irregulares.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular la respuesta del buque en mares irregulares típicos de las Islas Galápagos para diferentes condiciones de carga aplicando la teoría de fajas
- Evaluar la frecuencia de impacto en la estructura de conexión de los semicascos usando el espectro de la respuesta.
- Evaluar el confort de los pasajeros en un catamarán turístico que navega en mares irregulares aplicando la norma ISO 2631-1 y el factor MSI.
- Analizar la influencia de instalar un bulbo al catamarán sobre el confort de los pasajeros y el impacto en la estructura de conexión.

HIPÓTESIS

Los parámetros de confort establecidos por la norma ISO 2631-1 y el factor MSI (con sus siglas en inglés Motion Sickness Index) basados en la evaluación de vibraciones inducidas por olas, son satisfactorios para un catamarán de 28 [m] de eslora de servicio turístico operando en las Islas Galápagos.

BENEFICIOS

Uno de los factores importantes para evaluar el servicio de turismo en las Islas Galápagos es el confort en las navegaciones. Con el desarrollo de este proyecto se podrá analizar cuáles son las probabilidades de mareo de una persona expuesta a las condiciones de mar de las Islas Galápagos. Además, se podrá identificar cuál es la velocidad crítica de la embarcación, el rango de frecuencias y otros parámetros que influyen en los índices de mareo de pasajeros a bordo. Todo esto se lo tendrá en consideración en futuros diseños para disminuir de alguna manera estos factores. Obteniendo a largo plazo, la reducción de pasajeros que se marean, siendo más agradable su estancia a bordo.

CAPÍTULO 1

1. RESPUESTA DEL BUQUE EN MAR IRREGULAR

1.1 Descripción del buque

El catamarán Galaxy II tipo crucero de diseño nacional construido con poliéster (ortoftálico/isoftálico) reforzado con fibra de vidrio, se dedica a la actividad turística en las Islas Galápagos. Es una embarcación con amplias áreas de descanso, enfocado principalmente en el transporte de pasajeros entre las islas con tours de hasta 15 días. A continuación, se muestran las características principales del buque:

		Unidad
Eslora total	28.00	m
Manga moldeada total	10.50	m
Manga de cada semicasco	2.71	m
Puntal de escantillonado	3.40	m
Calado de diseño	1.25	m
Desplazamiento total	106.8	Ton
Distancia interior entre semicascos	5.00	m
Espaciamiento entre quillas de semicascos	7.74	m
Velocidad	10	nudos
Potencia principal	350x2	HP
Número de pasajeros y tripulantes	16/10	personas
Autonomía	15	días

Tabla 1.1: Dimensiones principales del catamarán, (Morante, 2015).

Plano de líneas de formas y distribución

Las secciones del catamarán poseen pantoque redondo sin bulbo de proa. El catamarán está conformado por 4 cubiertas: inferior, principal, superior y para tomar sol. A continuación, en las Figuras 1.1 y 1.2, se presenta el plano de líneas de formas y de distribución general del catamarán.

PLANO DE LINEAS DE FORMAS

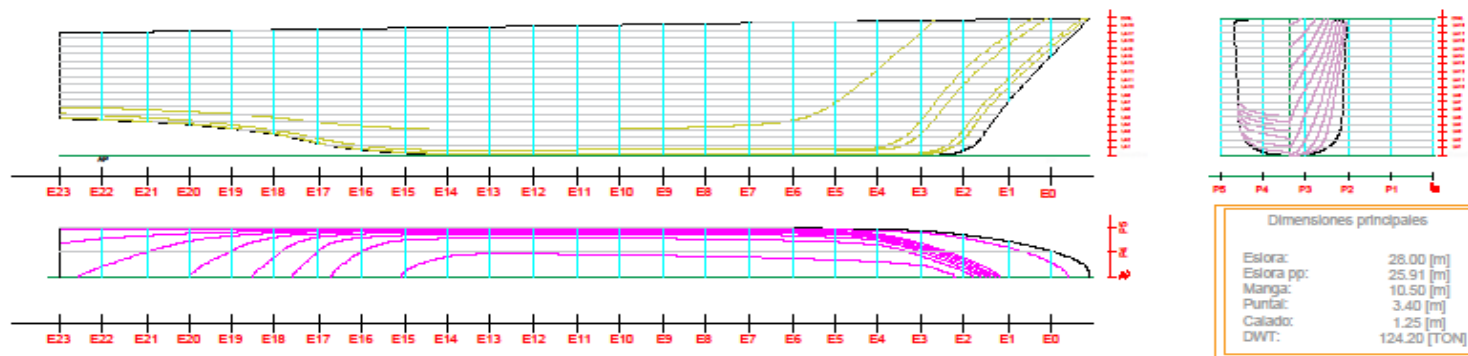


Figura 1.1: Plano de Líneas de formas catamarán Galaxy.

PLANO DE DISTRIBUCIÓN GENERAL

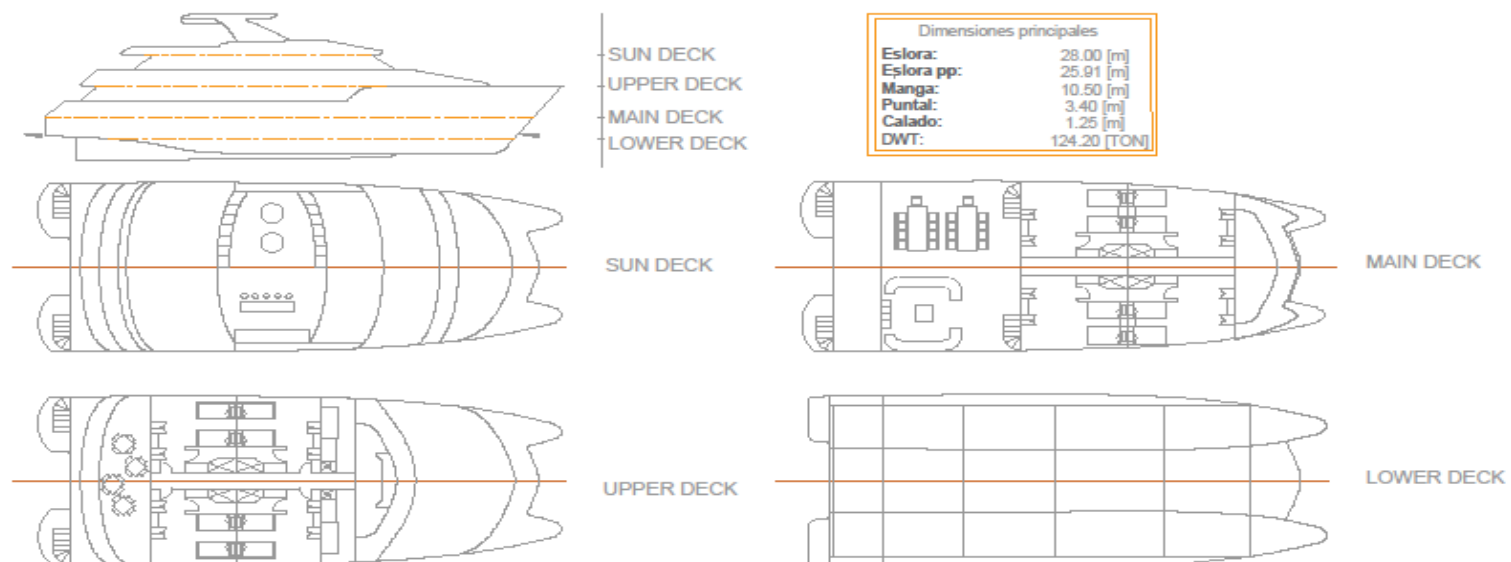


Figura 1.2: Plano de distribución del catamarán Galaxy II.

Modelado 3D de las formas

A partir del plano de líneas de formas mostrado en la Figura 1.1, se modela el casco en 3D, usando el software Rhinoceros. Considerando que las formas de los semicascos son simétricas, se genera únicamente la mitad de la superficie de un semicasco. Utilizando el perfil del buque, las líneas de agua y las secciones transversales de la mitad del semicasco se generó la estructura alámbrica del semicasco con la ayuda del comando rotar (`Rotate3D`). Luego, usando el comando generación de superficie (`NetworkSrf`) se crean las formas del semicasco. Finalmente, mediante el comando simetría (`Symmetry`) se puede reflejar las superficies restantes.

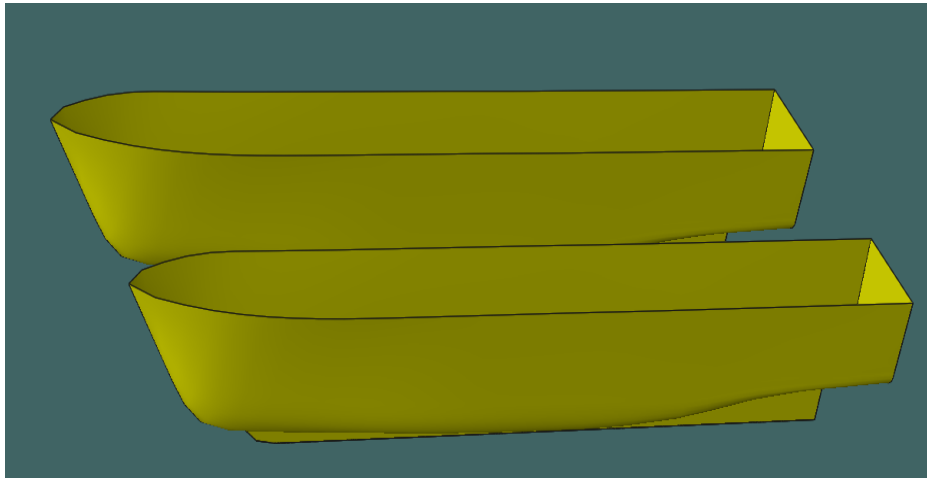


Figura 1.3: Modelado 3D del catamarán.

1.2 Condiciones de análisis

En el presente trabajo, el sistema de referencia tiene el eje x apuntando hacia proa, el y hacia babor y, el z hacia arriba. Los movimientos del buque se denominan así: traslación en x , largada, en y , ladeo, en z , levantamiento, y, rotación en x , rolido, en y , cabeceo, y, en z , guiñada.

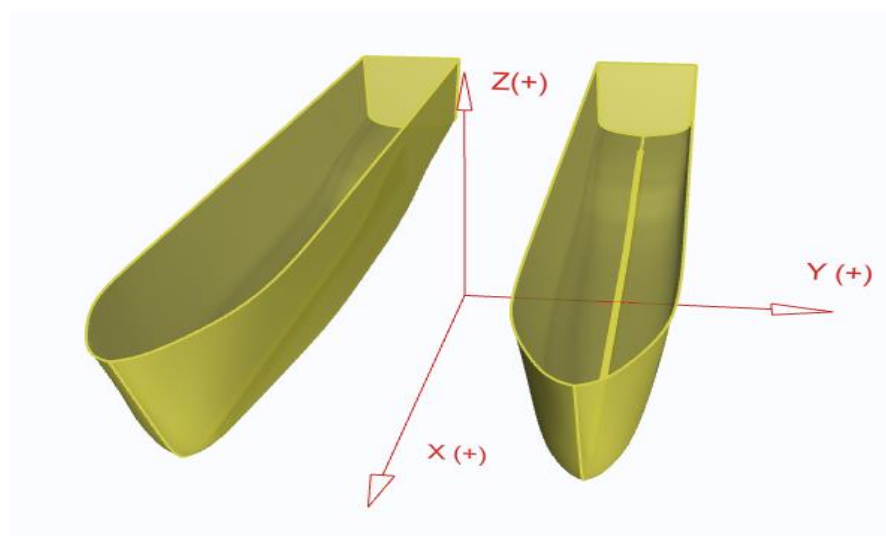


Figura 1.4: Convención de signos.

Condiciones de carga, velocidades de avance

Para poder determinar el comportamiento de un buque en el mar, se necesita conocer algunos parámetros tales como: condiciones de carga, rango de velocidades, estado de mar en el que opera, posiciones de análisis en el buque y dirección con que las olas golpean a la embarcación. A continuación, se describen los parámetros a considerar en este trabajo.

Considerando que se trata de una embarcación de turismo, existen dos condiciones de cargas extremas, salida de puerto a máxima carga y llegada a puerto con un 10% de consumibles.

En la Tabla 1.2 se detallan las condiciones de análisis, con el VCG tomado del reporte de estabilidad del buque (Morante, 2015) y el GM_T calculado en este proyecto.

Condición	Descripción	Calado [m]	Desplazamiento [Ton]	VCG [m]	GM_T [m]
1	Máxima carga	1.30	113.50	3.083	17.65
2	Llegada a puerto	1.18	97.83	3.472	18.03

Tabla 1.2: Condiciones de carga del catamarán.

En este trabajo, se considera la velocidad máxima de diseño del buque 10 nudos y una reducida de 8. Además, para el radio de giro de la embarcación para lo cual se asume el 40% de la manga para rolido, y, el 25% de la eslora para levantamiento y cabeceo (Prasanta & J, 2009).

Frecuencias naturales en levantamiento y cabeceo

Las ecuaciones de movimiento de levantamiento y cabeceo acoplados en las que se ha tomado como solución de funciones armónicas (Edward V. Lewis (SNAME), 1988):

$$(-\omega_e^2 M + i\omega_e B_{33} + C_{33})\zeta_3 + (-\omega_e^2 A_{35} + i\omega_e B_{35} + C_{35})\zeta_5 = F_{ex3}$$

$$(-\omega_e^2 I + i\omega_e B_{55} + C_{55})\zeta_5 + (-\omega_e^2 A_{53} + i\omega_e B_{53} + C_{53})\zeta_3 = F_{ex5}$$

donde,

ζ_3 y ζ_5 , son amplitudes complejas de levantamiento y cabeceo en sección media.

M : masa virtual de buque

I : inercia virtual del buque

γ : peso específico del agua de mar

$C_{33} = \gamma A_{pf}$, siendo A_{pf} , el área del plano de flotación.

$C_{55} = \gamma I_{pf}$, siendo I_{pf} , la inercia del plano de flotación

$C_{55} = \gamma(A_{pf} * l_{cf})$, siendo l_{cf} , posición longitudinal del centro de flotación respecto de sección media.

El cálculo de los coeficientes, fuerzas de excitación y momentos representan el problema principal en cualquier cálculo de movimiento de embarcaciones. El problema es simplificado considerando que el problema es de oscilación lineal y por tanto se descartan las excitaciones. Luego en la ecuación, el término independiente debe ser {0}. Con lo cual se resuelven las ecuaciones de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M + C_{33} & C_{35} \\ C_{35} & -\omega^2 I + C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_3 \\ \zeta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{ex3} \\ F_{ex5} \end{bmatrix}$$

Haciendo nulo el determinante de la matriz para obtener una solución no trivial, obtenemos la ecuación característica Ecuación 1:

$$\omega^4 MI - \omega^2 (M C_{55} + I C_{33}) + C_{33} C_{55} - C_{35}^2 = 0, \text{ Ecuación 1}$$

Y a partir de ella, se obtienen las frecuencias naturales del sistema para cada una de las condiciones:

	Condición 1	Condición 2	unidades
LWL	24.73	25.72	[m]
B _{semicasco}	2.71	2.71	[m]
T	1.30	1.18	[m]
Desplac _{virt}	90800	78264	[kg]
I _{virt}	7661315.89	6552529.94	[Kg*m ²]
A _{pf}	62.28	59.32	[m ²]
I _{pf}	3109.90	3073.91	[m ⁴]
l _{cf}	-1.79	-1.40	[m]
ω_{01}	1.88	2.07	[1/s]
ω_{02}	2.73	2.83	[1/s]

Tabla 1.3: Frecuencias naturales del sistema acoplado.

Las frecuencias de máxima respuesta tienen valores algo menores que los de oscilación libre.

Frecuencia natural de balance

Es el movimiento angular que experimenta el buque con respecto a un eje con dirección longitudinal. Mediante la formulación descrita a continuación, se puede calcular el periodo de balance (Dubrovsky & Lyakhovitsky, 2001):

$$\tau_{\phi} = 2\pi \sqrt{\frac{I'_{xx}}{\Delta GM_T}}$$

donde,

τ_{ϕ} = Período de balance

I'_{xx} = Momento virtual de inercia con respecto al eje x

GM_T = Altura Metacéntrica transversal

$$I'_{xx} = \frac{\Delta^l}{g} k_{xx}^2$$

donde,

$\Delta^l = 2 \Delta$; aproximación considerando el efecto masa añadida.

$k_{xx} = 0.61B$; considerando el efecto por masa añadida.

A continuación, se resume el cálculo de la frecuencia natural de balance:

Condición	Calado [m]	Δ [Ton]	GM_{τ} [m]	I_{xx} [Ton*m*s ²]	τ_z [s/ciclo]	ω_0 [rad/s]
1	1.30	113.5	17.65	657.79	2.06	1.75
2	1.18	97.83	18.03	566.97	2.02	1.76

Tabla 1.4: Frecuencia de balance.

Posiciones de análisis en el buque

Para analizar el confort de los pasajeros en un buque, es necesario definir en qué posición del catamarán se ubican los pasajeros. En este trabajo, se han considerado las siguientes posiciones para analizar el confort de los pasajeros, ver tabla 1.5 y Figura 1.5 y 1.6:

Punto	Descripción	Posición X	Posición Y	Posición Z
1	Cubierta de soleo hacia proa	2.84	0.00	7.27
2	Cubierta de soleo bar	-1.27	0.00	7.27
3	Cubierta de soleo terraza de sol	-8.73	0.00	7.27
4	Cubierta superior puente de gobierno	3.54	0.00	5.28
5	Cubierta superior cabina de pasajeros	-2.45	-4.20	5.28
6	Cubierta superior bar	-9.17	0.00	5.28
7	Cubierta principal pasillo	10.48	0.00	3.28
8	Cubierta principal cabina de pasajeros	7.06	-2.77	3.28
9	Cubierta principal comedor	-9.67	2.95	3.28
10	Cubierta inferior cabina de tripulantes	7.60	-3.49	1.29
11	Estructura de conexión de los semicascos	10.75	0.00	2.49

Tabla 1.5: Puntos de análisis en el catamarán Galaxy II (medidos desde sección media).

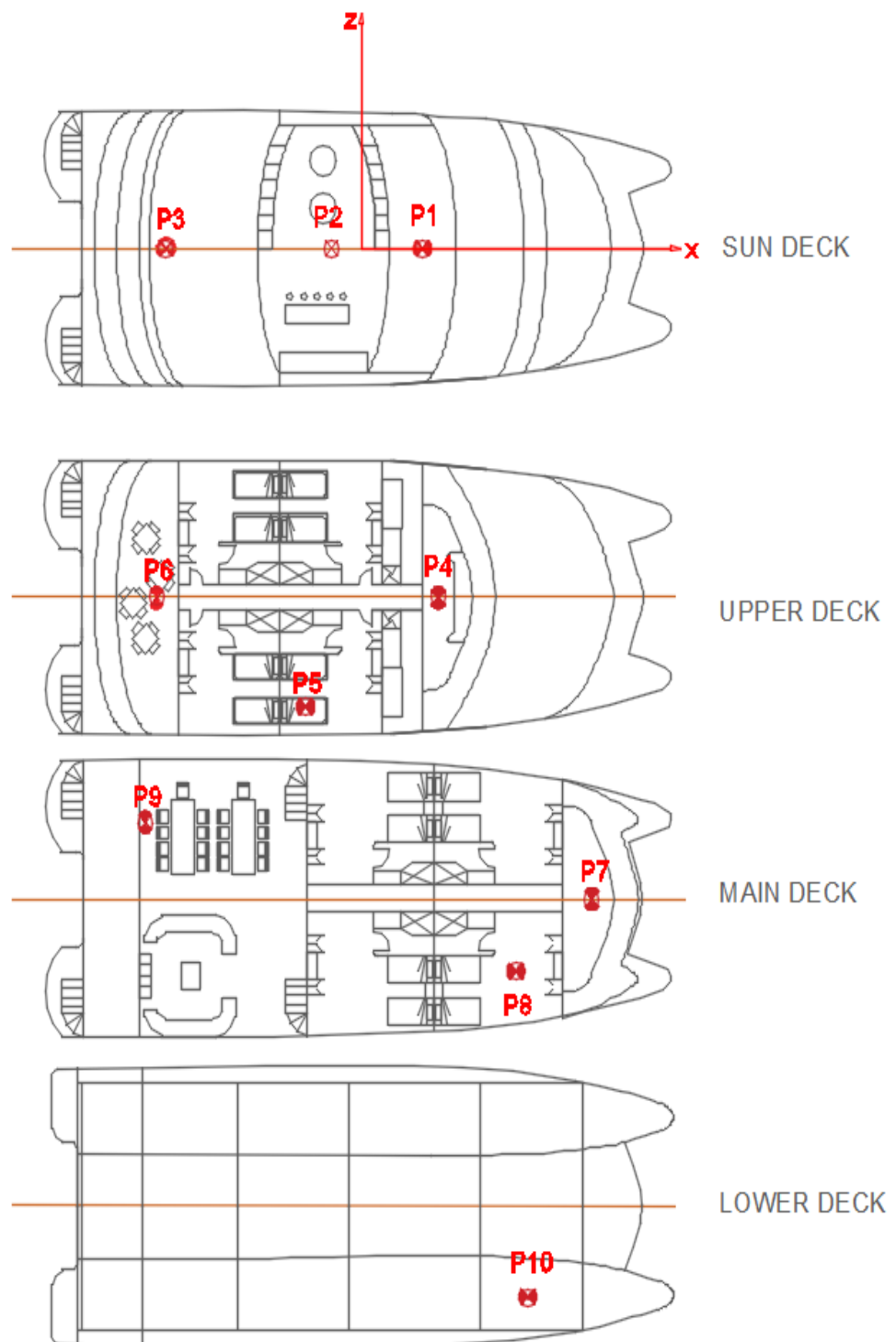


Figura 1.5: Posiciones de análisis en la vista de planta.

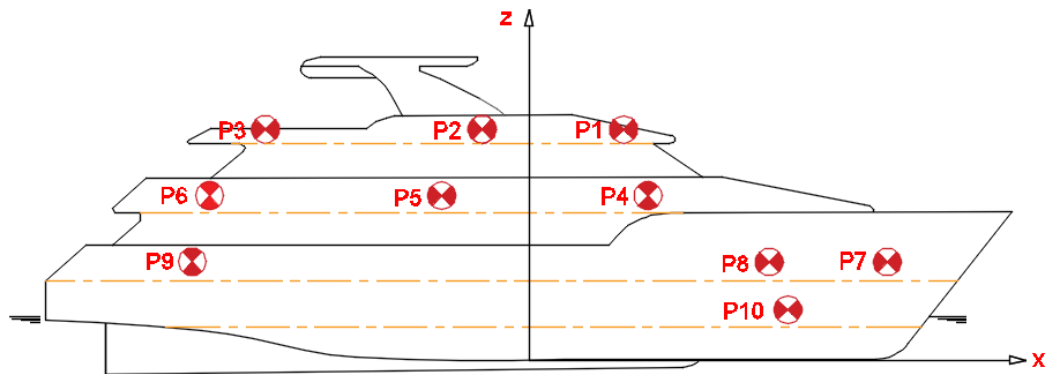


Figura 1.6: Ubicación de las posiciones de análisis vista de perfil.

Direcciones de olas respecto al buque

Considerando que el catamarán navega en un mar irregular es muy probable que las olas se mueven en diferentes direcciones relativas al buque. Entonces para desarrollar el análisis, se establecen un rango de direcciones de olas desde 0 a 180 grados con intervalos de 30 grados. En la Figura 1.7 se indican las direcciones de olas con respecto al buque.

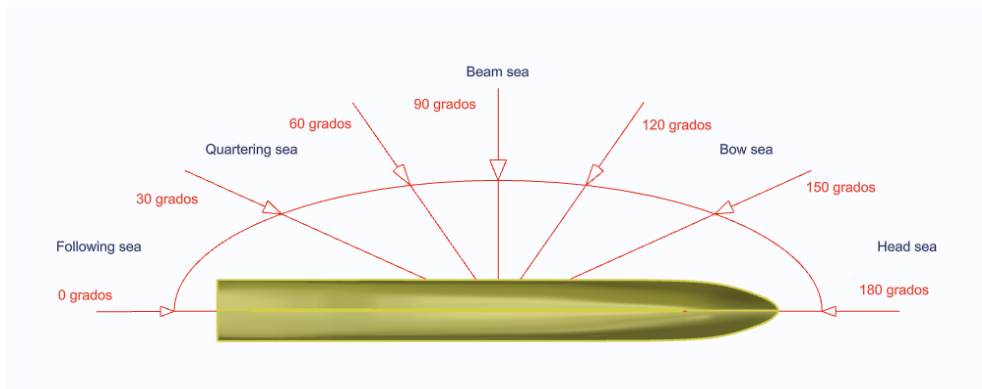


Figura 1.7: Definición del ángulo de encuentro β .

La frecuencia de encuentro está influenciada por la dirección relativa entre la frecuencia de las olas y la velocidad del buque.

Estados de mar de las Islas Galápagos

A partir de datos publicados por el INOCAR (Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, 2015) se puede conocer la altura significativa de las olas para los diferentes meses de un año promedio, como se muestra en la siguiente tabla:

Mes del año	Altura significativa,[m]
Enero	1.50
Febrero	1.30
Marzo	1.60
Abril	1.50
Mayo	1.60
Junio	1.70
Julio	1.80
Agosto	1.60
Septiembre	1.50
Octubre	1.30
Noviembre	1.25
Diciembre	1.20

Tabla 1.6: Altura significativa de las olas en la zona de Galápagos.

Fuente: INOCAR (Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, 2015)

En función de la altura significativa se puede establecer el estado en el cual se encuentra un mar en particular. Mediante la Tabla 5.1 del libro de Battacharyya (Bhattacharyya, 1978), se obtienen los valores de alturas significativas para los diferentes estados de mar. Estos valores son graficados en la Figura 1.8 para obtener una ecuación polinómica de grado 2.

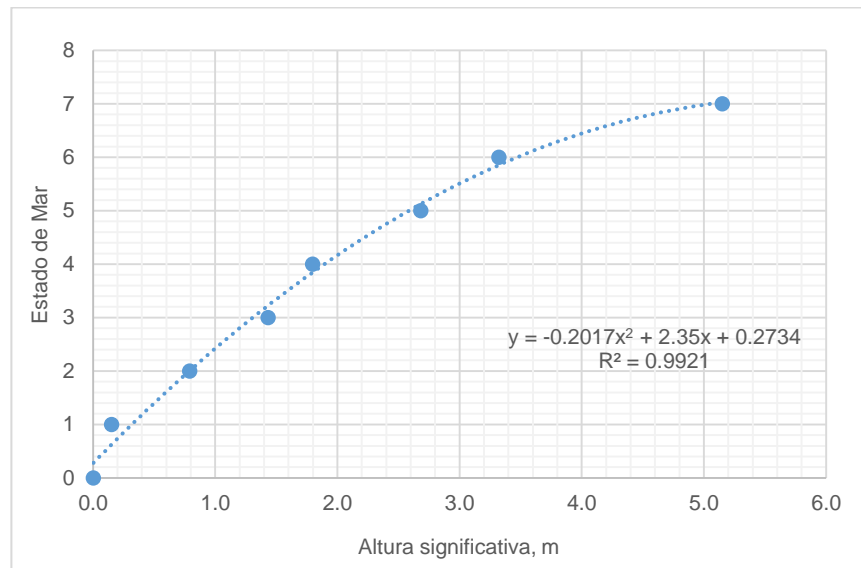


Figura 1.8: Alturas significativas para los diferentes estados de mar.

Con esta relación de regresión se determina y se grafica el estado de mar en función del mes del año en las Islas Galápagos, Figura 1.9. El máximo valor de altura significativa ocurre en el mes de Julio en estado de mar 4, y el mínimo en Diciembre, estado de mar de 3. Estas son las condiciones a aplicar en el análisis de confort de los pasajeros.

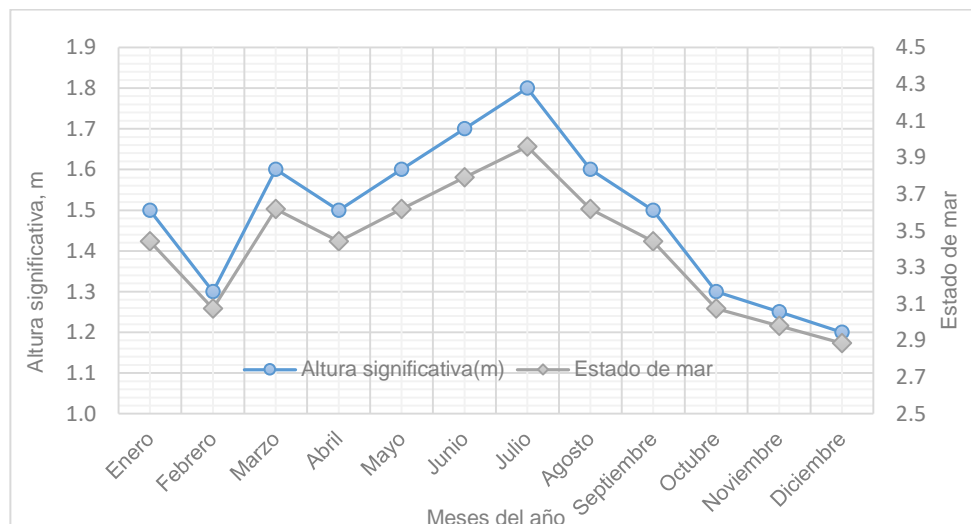


Figura 1.9. Estado de mar de las Islas Galápagos.

1.3 Respuesta del buque en olas regulares

Los RAO (Response Amplitude Operator) se definen como la amplitud de la respuesta por unidad de amplitud de ola regular (Edward V. Lewis (SNAME), 1988). Se los calcula considerando olas incidentes regulares y asumiendo que los movimientos no exceden el ámbito lineal.

Como ya se definió en el subcapítulo 1.2 para este trabajo se han seleccionado 7 direcciones de ola respecto del buque y a partir de los primeros resultados se determinan las condiciones que causan mayor movimiento. Estas condiciones ocurren cuando las olas vienen desde proa ($\beta=180^\circ$) y por el costado ($\beta=90^\circ$), de manera que en este proyecto solo se analizan dichas condiciones. A continuación, se presentan los RAO para los diferentes movimientos del buque (Maxsurf Motion, 2013).

A continuación se presentan los RAO's de levantamiento, cabeceo y rolo en las diferentes condiciones de análisis. Para facilidad de comparación se los grafica tanto en función de la frecuencia de encuentro ω_e como de la longitud de ola relativa a la eslora del buque λ/L :

$$RAO_z = \frac{\zeta_3}{\zeta_0} \quad RAO_\theta = \frac{\zeta_4}{k\zeta_0} \quad RAO_\phi = \frac{\zeta_5}{k\zeta_0}, \text{ Ecuación 2}$$

donde,

ζ_0 : Amplitud de la ola,

ζ_3 : Amplitud de levantamiento,

ζ_4 : Amplitud de balance,

ζ_5 : Amplitud de cabeceo, y,

k : Número de la ola.

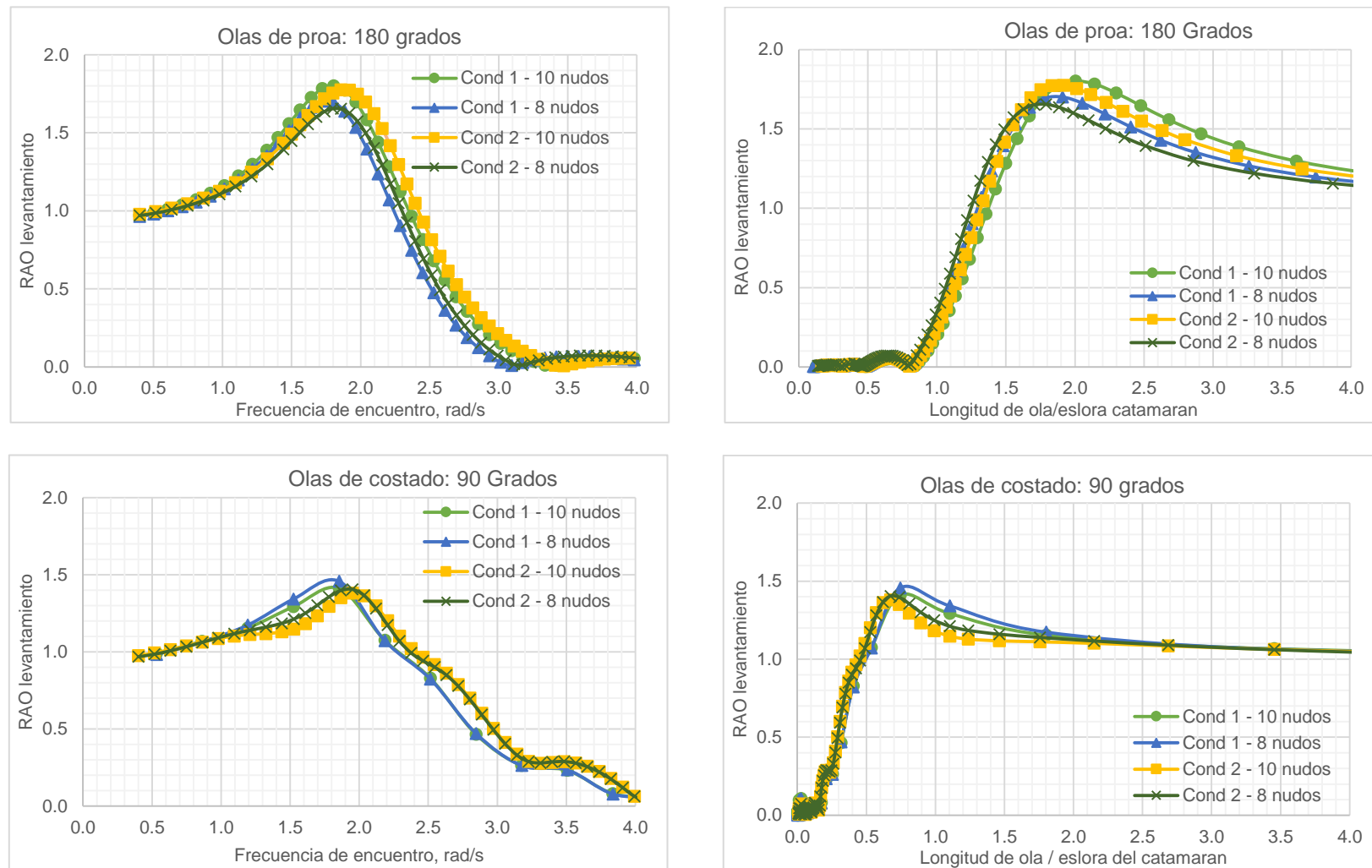


Figura 1.10: RAO de levantamiento con direcciones de ola de 180 y 90 grados.

La máxima amplitud de movimiento para olas de proa y de costado ocurre a velocidad de 10 (nudos) para ambas condiciones de carga del buque (C_1 , C_2) en un rango de frecuencias 1.7– 2.3 (rad/s). Este rango es muy cercano al de las frecuencias naturales de manera que este pico se debe a resonancia. Sin embargo, no existe diferencia considerable entre cada una de las condiciones.

En el ámbito lineal cuando se reciben olas de proa, el balance es nulo de manera que solo se presentan los RAO de dicho movimiento con olas de costado.

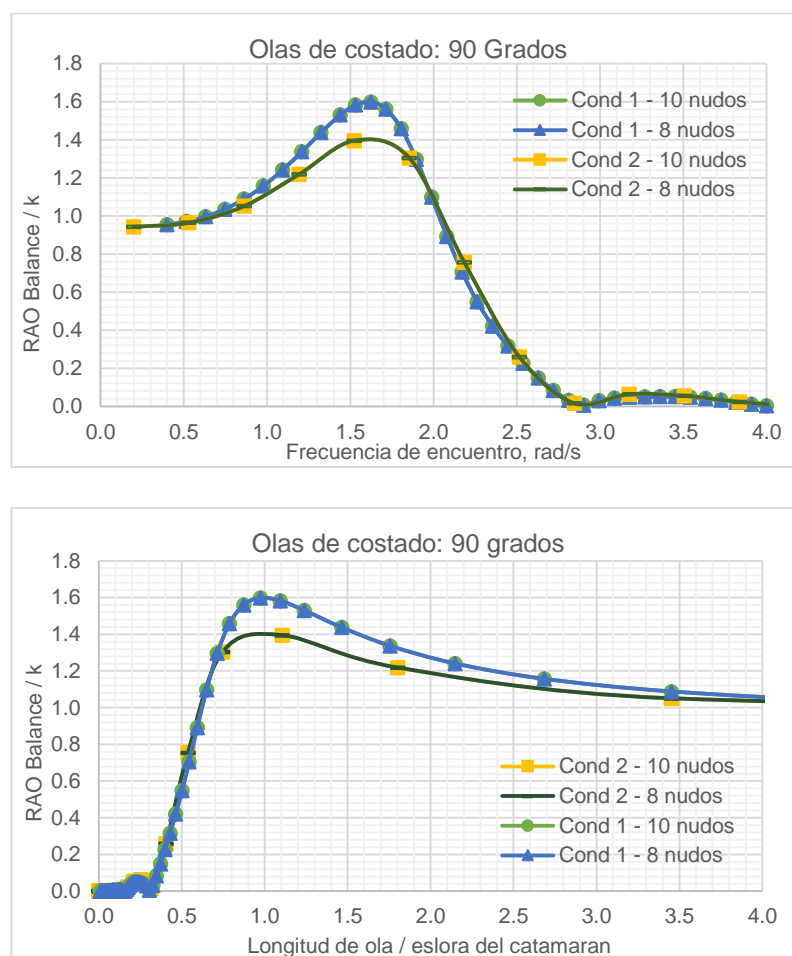


Figura 1.11: RAO de balance con olas de costado.

La máxima amplitud de balance ocurre en un rango de frecuencia alrededor de 1.75 rad/s, debido a la resonancia con la frecuencia natural de balance 1.85 rad/s.

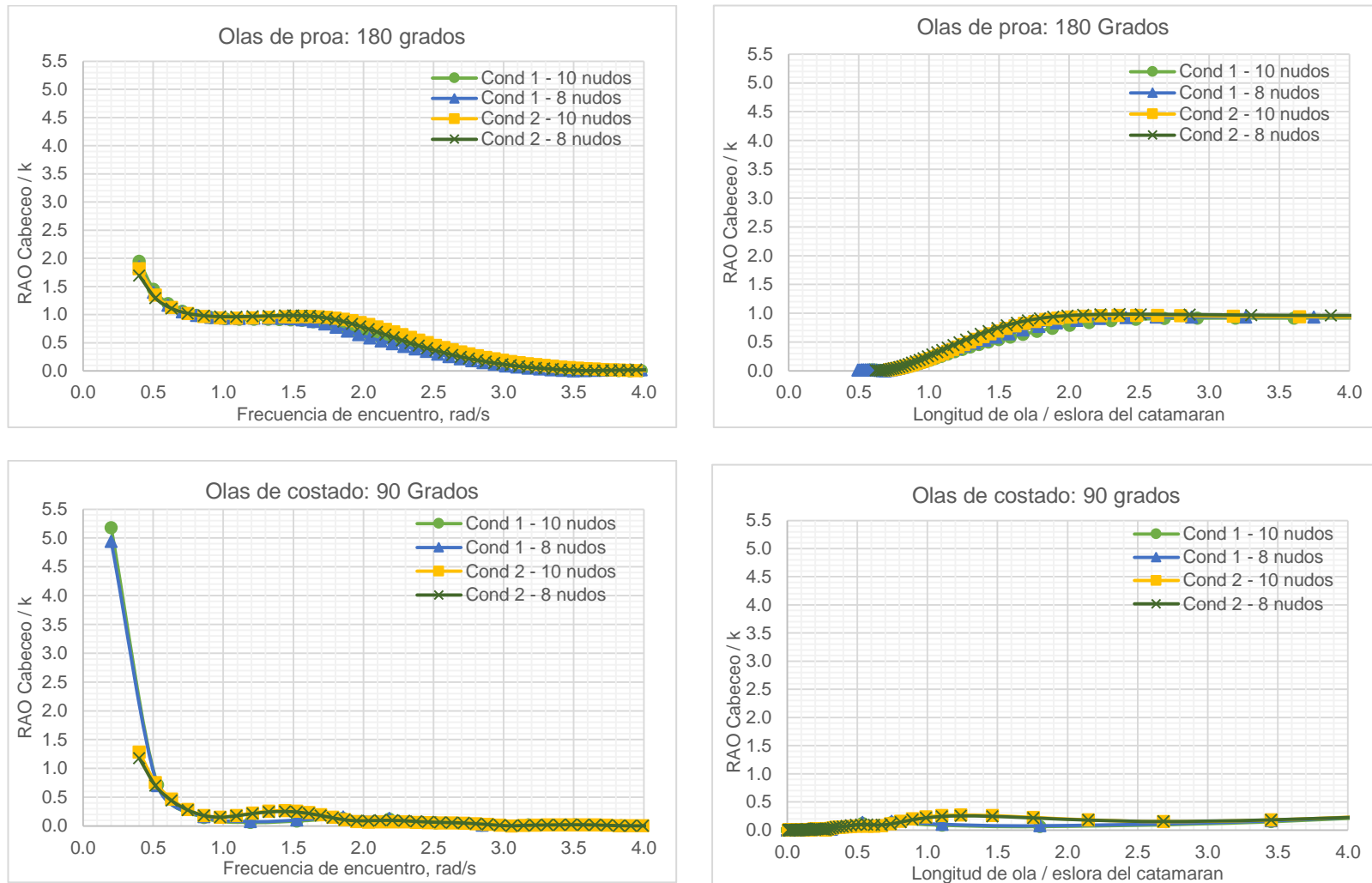


Figura 1.12: RAO's de cabeceo con dirección de ola de 180 y 90 grados

Como era de esperarse la amplitud de cabeceo muestra valores máximos para direcciones de olas de 180 grados, considerando que las olas de proa poseen mayor influencia en la respuesta del buque. La máxima amplitud ocurre a una frecuencia de encuentro de 1.85 rad/s por la resonancia con la frecuencia natural de cabeceo 1.90 (rad/s).

Para bajas frecuencias, la longitud de ola incrementa considerablemente, lo cual causa que el centro de boyantez del catamarán se mueva hacia popa, obteniendo para bajas frecuencias un incremento en asiento por traslado del centro de boyantez.

Amplitud del movimiento Relativo proa – ola

Uno de los factores que influyen en la comodidad de los pasajeros a bordo en embarcaciones tipo catamarán, es el golpeteo de las olas con la estructura de conexión de los semicascos. En este trabajo se pretende evaluar este fenómeno, por lo tanto se debe calcular el movimiento relativo de la elevación de la superficie de la ola con respecto al movimiento vertical del punto más bajo del cuerpo de conexión entre semicascos, véase Figura 1.13.

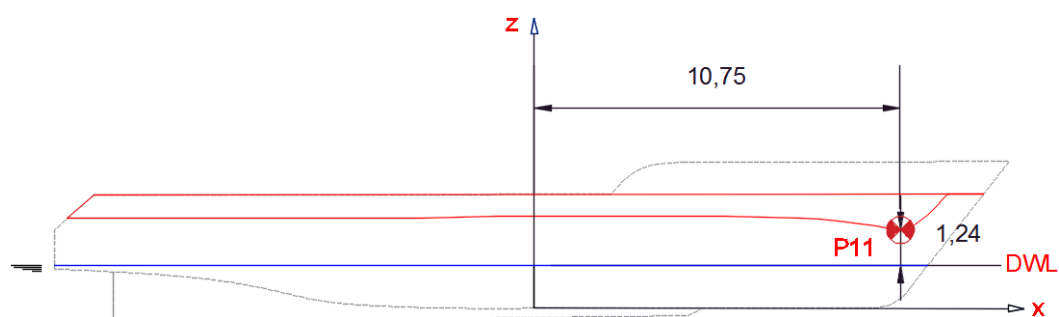


Figura 1.13: Punto más bajo del cuerpo de conexión entre semicascos.

Considerando que la ubicación del punto se encuentra hacia la proa de la embarcación, el análisis se restringirá solo para olas de proa ($\beta=180$ grados), dado que producen la más alta respuesta del buque, y la mayor probabilidad de que el punto de análisis sea alcanzado por la superficie de la ola.

La función que describe la elevación de la ola regular de amplitud ζ_0 , está dado por:

$$\zeta_0(x,t) = \zeta_0 \text{sen}(k(-x \cos \beta) + \omega_e t), \text{ Ecuación 3}$$

donde:

ω_e = frecuencia de encuentro

x = posición del punto de análisis medido desde sección media

β = dirección de la ola respecto del buque.

Considerando las amplitudes de levantamiento y cabeceo definidas en el subcapítulo 1.3 y la función que describe la superficie de la ola, se puede calcular el movimiento relativo entre el punto de análisis y la superficie del mar.

$$w = (\zeta_3(t) + x_{proa} * \zeta_5(t)) - \zeta_0(x,t), \text{ Ecuación 4}$$

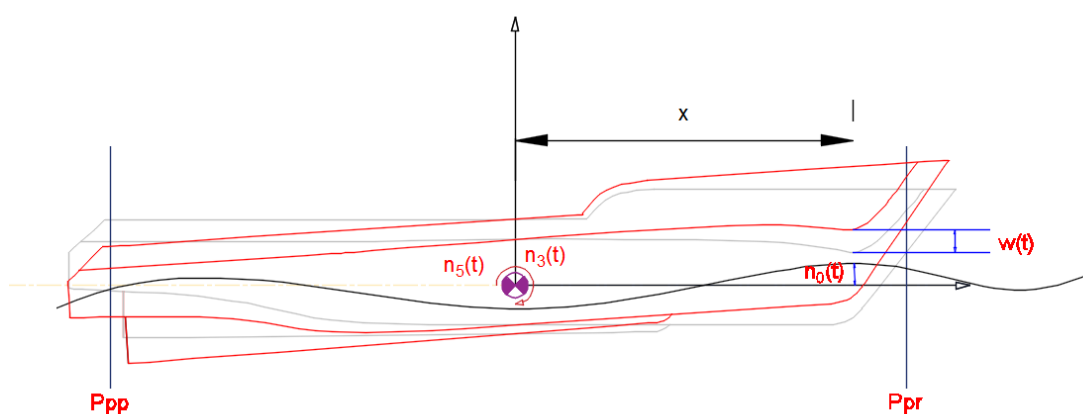


Figura 1.14. Movimiento relativo proa - ola.

A continuación, se grafica el RAO del movimiento relativo en el punto de la estructura de conexión ya mencionado.

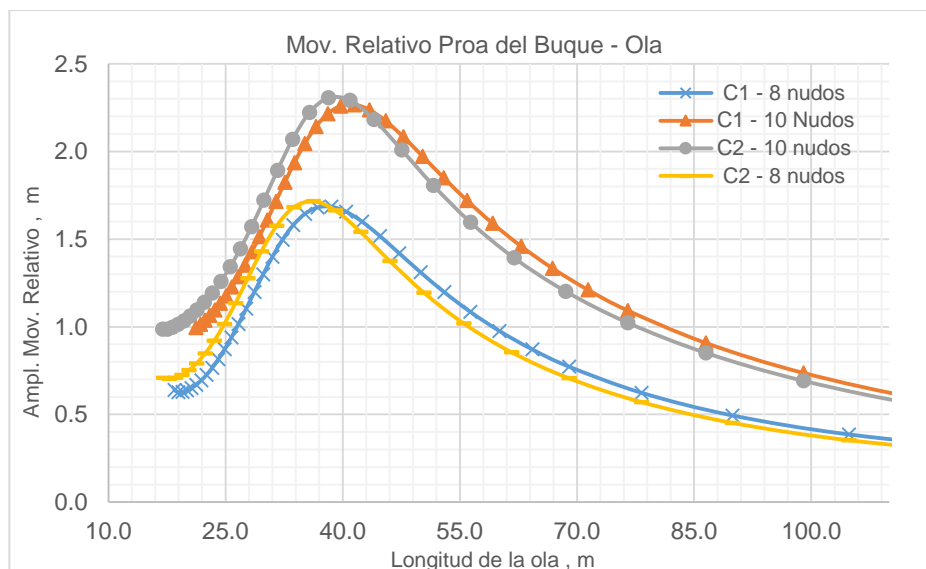


Figura 1.15: Amplitudes del movimiento relativo proa - ola.

La amplitud del movimiento relativo muestra un máximo para una longitud de ola alrededor de 35 a 45 metros cuando el buque avanza a una velocidad de 10 nudos. Se nota poca diferencia entre las dos condiciones de carga a la misma velocidad de análisis.

1.4 Espectros de las respuestas

Espectro para los diferentes estados de mar

Como ya se definió en el subcapítulo 1.2 el estado de mar en el que se encuentran las Islas Galápagos está entre 3 – 4 y para describirlo se usa el espectro de dicho estado. Un espectro de mar es una distribución de energía de la ola por unidad de frecuencia y por sector de unidad direccional (Volker, 2000). Para definirlo analíticamente en este trabajo se ha utilizado la formulación de Bretschneider o ITTC con dos parámetros, descrita a continuación (Bhattacharyya, 1978):

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right), \text{ Ecuación 5}$$

donde las constantes A y B se definen de la siguiente manera:

$$A = 173(H_{1/3})^2 T_1^2, y,$$

$$B = 691/T_1^4$$

$H_{1/3}$ es la altura significativa del estado de mar, y, $T_1 = 0.773\tau_m$, donde τ_m , es el periodo modal.

Del libro de Battacharyya (Bhattacharyya, 1978), se toman los siguientes valores para las alturas significativas y periodos modales para los estados de mar 3 y 4:

Estado de mar	Altura significativa, [m]	Período modal, [s]	Frecuencia modal, [rad/s]
3	1.098	5.3	1.18
4	2.013	7.2	0.87

Tabla 1.7: Altura significativa y período modal para los estados de mar analizados.

Para considerar la influencia del encuentro, pero manteniendo la energía total del estado de mar, el espectro está dado por:

$$S_{\eta}(\omega_{oe}) = \frac{S_{\eta}(\omega)}{1 - \frac{2\omega v}{g} \cos \beta}, \text{ Ecuación 6}$$

donde,

v = velocidad del buque

g = aceleración de la gravedad

β = ángulo de encuentro entre la trayectoria del buque y la dirección de la ola

A continuación, se grafican los espectros para los diferentes estados de mar en función de la frecuencia de la ola y la frecuencia de encuentro.

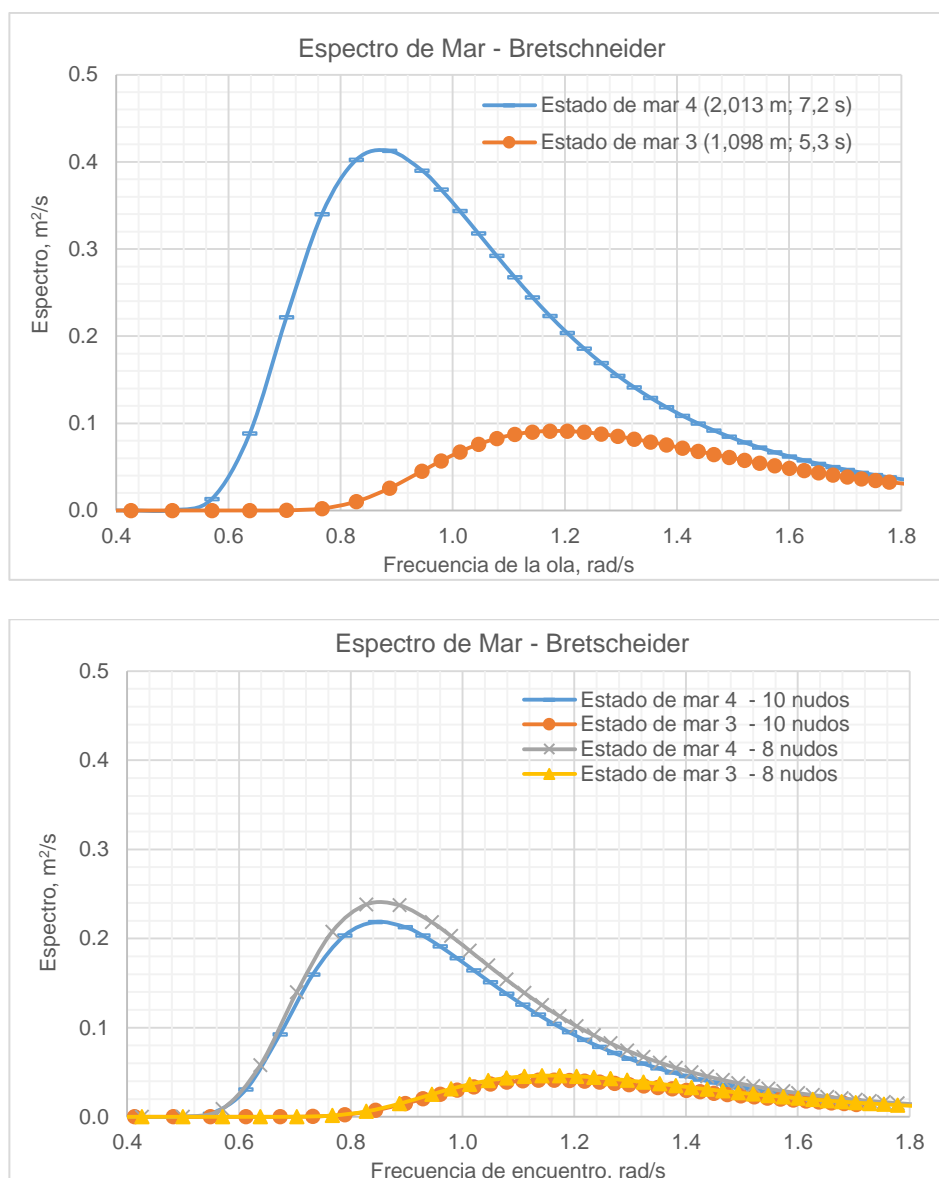


Figura 1.16: Espectros para estados de mar 3 y 4

Espectro de la respuesta del movimiento relativo

Una vez calculado los RAO's de las respuestas de interés, y establecido el espectro de olas incidentes, el espectro de la respuesta es igual al producto del cuadrado de la amplitud de respuesta por unidad de amplitud de ola incidente multiplicado por el espectro de ola incidente (Bhattacharyya, 1978):

$$s_w(\omega_e) = RAO_w^2 s_\eta(\omega_e), \text{ Ecuación 7}$$

A continuación, se presenta el espectro del movimiento relativo del cuerpo de conexión entre semicascos respecto de la elevación de las olas, para los estados de mar analizados:

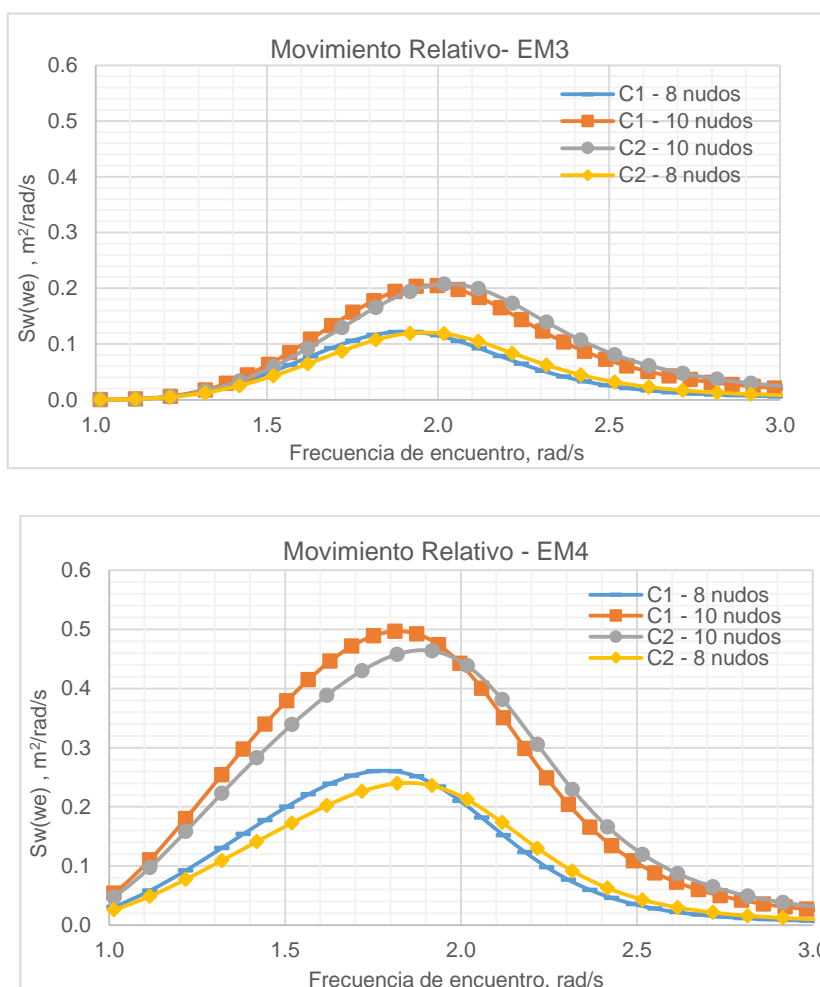


Figura 1.17: Espectro del movimiento relativo entre el punto de análisis - ola.

La amplitud del espectro del movimiento relativo es mayor para el estado de mar 4 a una velocidad de 10 nudos, considerando que las características del estado de mar son mayores en comparación al estado de mar 3. En ambos casos, la embarcación a 10 nudos muestra mayores valores de densidad espectral del movimiento relativo.

Espectro de la respuesta de la velocidad relativa

Una vez obtenido el espectro de la respuesta del movimiento relativo, es necesario multiplicarlo por la frecuencia de encuentro para obtener el espectro de la velocidad relativa.

$$s_v(\omega_e) = \omega_e s_w(\omega_e), \text{ Ecuación 8}$$

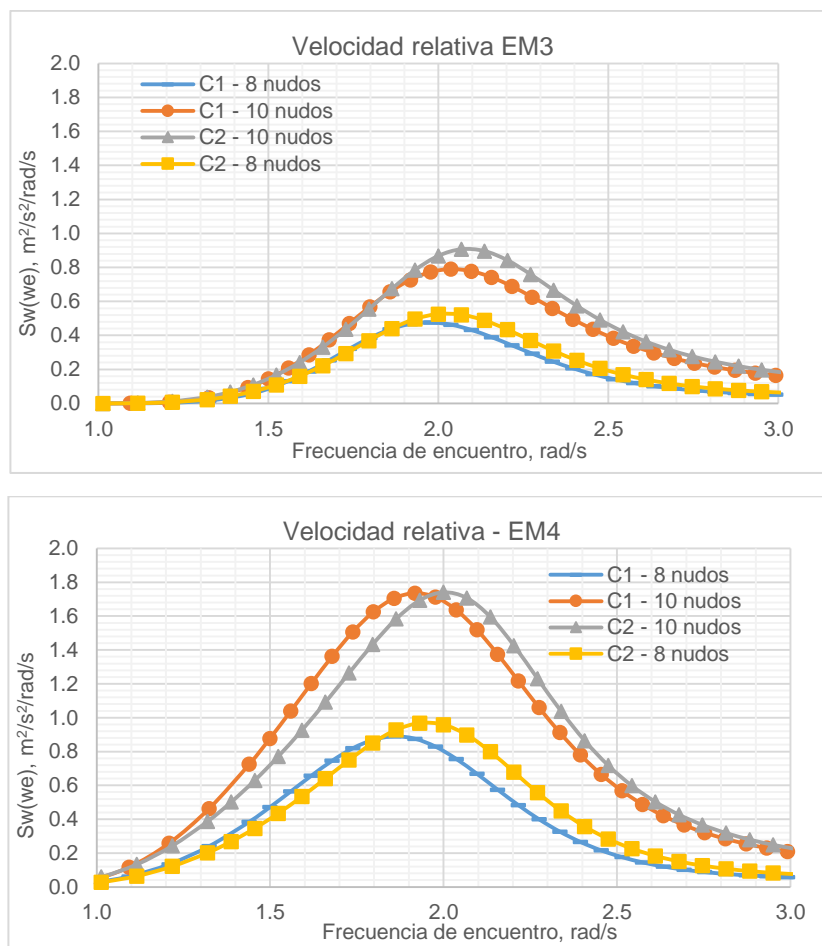


Figura 1.18: Espectro de la velocidad relativa en la estructura de conexión.

Se observa que, el espectro de la velocidad relativa presenta valores mayores para el estado de mar 4 a una velocidad de 10 nudos y en condición de carga ligera C_2 . La frecuencia de mayor densidad espectral es aproximadamente 1.9 rad/s.

Espectro de la respuesta de la Aceleración absoluta

Mediante el software computacional aplicado para el desarrollo de este proyecto se obtuvo la aceleración absoluta para cada uno de las posiciones de análisis definidas en el capítulo 1. A continuación, se muestra el espectro de la aceleración absoluta para el punto 10 ubicado en la cubierta inferior de los tripulantes (ver posición en la Tabla 1.5).

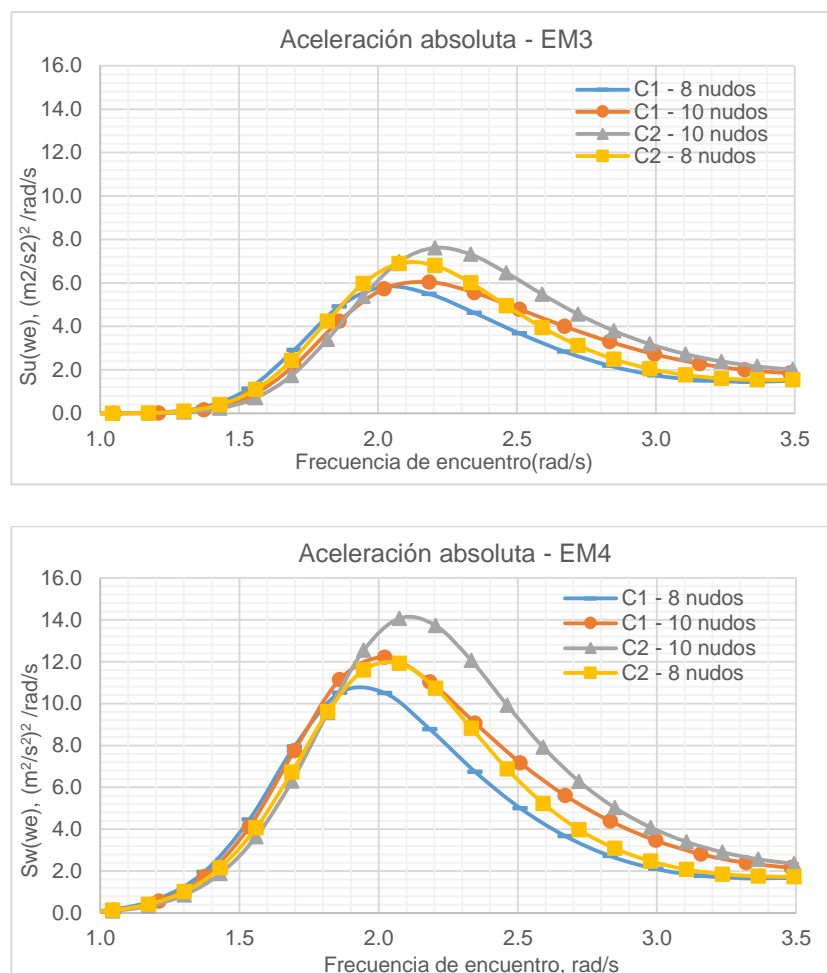


Figura 1.19: Espectro de la aceleración absoluta para estado de mar 3 y 4.

CAPÍTULO 2

2. FRECUENCIA DE IMPACTO EN LA ESTRUCTURA DE CONEXIÓN DE LOS SEMICASCOS

En una variable aleatoria de espectro de banda angosta, los máximos locales tienden a describirse probabilísticamente con la distribución de Rayleigh (Edward V. Lewis (SNAME), 1988). A partir de dicha función de densidad probabilística se puede evaluar la probabilidad de exceder determinado valor crítico, por ejemplo que la superficie del agua alcance la estructura de conexión de los semicascos. Para definir la función de Rayleigh se requiere de la varianza, que corresponde al área bajo la curva del espectro.

Para que ocurra un golpe hidrodinámico en la estructura de conexión de los semicascos de un catamarán, deben ocurrir dos eventos independientes (Bhattacharyya, 1978):

1^{ero}: El movimiento relativo buque – superficie de la ola supere la distancia vertical entre el punto de análisis y la superficie del agua.

2^{do}: La velocidad relativa buque – superficie de la ola en el momento del impacto supere una cierta velocidad crítica

Para calcular la probabilidad de que ocurra el primer evento, se puede Integrar la función de densidad probabilística de Rayleigh del movimiento relativo buque – superficie:

$$P(Z \geq z) = \exp(-z^2/(2m_{0z})), \text{ Ecuación 9}$$

donde,

z: valor a ser excedido.

m_{0z} : el área bajo la curva del espectro del movimiento relativo buque – superficie.

La función de densidad probabilística (Zurita Herrera, 2008) de dos eventos simultáneos independientes está descrita por la siguiente ecuación:

$$p(x, y) = p_x(x) p_y(y), \text{ Ecuación 10}$$

donde,

$P_X(x)$ y $P_Y(y)$: son las funciones densidad de las variables independientes

Asumiendo que el movimiento y la velocidad, relativos entre el buque y la superficie de la ola, son eventos estadísticamente independientes (Bhattacharyya, 1978), se aplica el concepto de probabilidad conjunta para obtener la probabilidad de impacto en la estructura de conexión entre los semicascos.

En el presente caso, se podrá obtener la densidad de los máximos locales del movimiento relativo y de la velocidad relativa, como el producto de sus funciones densidad por separado. Luego calculando el periodo promedio del movimiento relativo, se podrá estimar el número de veces que el agua alcanza la superficie de la estructura de conexión. Finalmente, con la probabilidad de que la velocidad relativa supere una velocidad crítica se puede estimar el número de veces que se producen golpes hidrodinámicos ("slams") sobre el cuerpo de conexión.

2.1 Densidad probabilística del movimiento relativo proa – ola

Cálculo de los momentos m_0 , m_2 , m_4

Para estimar parámetros estadísticos de las respuestas aleatorias del buque se requieren los momentos m_n , de orden 0, 2 y 4 de la función espectro de la respuesta del movimiento relativo, ya calculada en el capítulo interior.

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega_e^n S_R^+(\omega_e) d\omega_e, \text{ Ecuación 11}$$

donde, m_n es el n^{mo} momento del área bajo la curva del espectro (Edward V. Lewis (SNAME), 1988). El momento cero, m_0 corresponde a la varianza de la variable

aleatoria, en este caso el movimiento relativo superficie - buque. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Unidades	m_0 , [m ²]	m_2 , [m ² /s ²]	m_4 , [m ² /s ⁴]
Estado de mar 3			
C1 - 8 nudos	0.10	0.20	0.45
C1 - 10 nudos	0.18	0.78	3.94
C2 - 8 nudos	0.10	0.21	0.49
C2 - 10 nudos	0.19	0.71	3.05
Estado de mar 4			
C1 - 8 nudos	0.22	0.42	0.93
C2 - 8 nudos	0.23	0.41	0.93
C1 - 10 nudos	0.47	1.73	7.47
C2 - 10 nudos	0.49	1.63	6.61

Tabla 2.1: Momentos del espectro de respuesta del movimiento relativo buque /superficie ola.

Frecuencia de inmersión del cuerpo de conexión entre los semicascos

Integrando la función de densidad probabilística de Rayleigh es posible evaluar la probabilidad de que el movimiento relativo proa/ola supere la distancia vertical entre la superficie de la ola y la estructura transversal que une los semicascos:

$$P(Z \geq Z_{sb}) = \exp(-Z_{sb}^2 / (2m_{oz})), \text{ Ecuación 12}$$

Donde Z_{sb} representa la diferencia entre la posición vertical del punto de análisis 2.49 (m) y la altura de la superficie de la ola 1.30 (m), ambos medidos desde el eje de referencia indicado en el capítulo 1 es decir $Z_{sb}=1.19$ (m), para la condición 1. En el caso de la condición 2, la altura de la superficie de la ola es 1.18 (m) obteniéndose $Z_{sb}=1.31$ (m).

Velocidad 8 (Nudos)		
Estado de mar	Condición	$P(Z \geq z_{sb})$
3	1	0.003
3	2	0.001
4	1	0.067
4	2	0.058
Velocidad 10 (Nudos)		
Estado de mar	Condición	$P(Z \geq z_{sb})$
3	1	0.037
3	2	0.032
4	1	0.282
4	2	0.263

Tabla 2.2.-Probabilidad de que la superficie de la ola alcance la estructura de conexión entre los semicascos.

El periodo promedio $\bar{\tau}_p$ entre máximos sucesivos se puede aproximar aplicando la siguiente relación (Edward V. Lewis (SNAME), 1988):

$$\bar{\tau}_p = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}, \text{ Ecuación 13}$$

Combinando ambos resultados, periodo promedio y la probabilidad de que la superficie de la ola alcance la estructura de conexión es posible establecer el número de veces en una hora (3600 segundos) que la superficie de la ola alcanza el punto de análisis, con la siguiente relación:

$$N = \frac{3600}{\bar{\tau}_p} * P(Z \geq z_{sb}), \text{ Ecuación 14}$$

Finalmente, en la Tabla 2.3 se muestra el número de veces en una hora que el punto 11 tiene contacto con la superficie de la ola.

Estado de mar	Condición	$\bar{\tau}_p$ [s]	N
Velocidad 8 (Nudos)			
3	1	4.19	2
3	2	4.11	1
4	1	4.22	57
4	2	4.17	50
Velocidad 10 (Nudos)			
3	1	2.80	47
3	2	3.03	37
4	1	3.02	335
4	2	3.12	303

Tabla 2.3: Número de veces por hora que la superficie de la ola sobrepasa el punto de análisis.

De las ocasiones en que el nivel del agua deja la superficie del buque, se debe determinar cuántas causan golpes con suficiente energía para causar discomfort a los pasajeros.

2.2 Densidad probabilística de la velocidad relativa estructura de conexión – superficie de la ola

Cálculo de la velocidad umbral o crítica “Threshold velocity”

La velocidad crítica (u) sugerida por Ochi (1964), (Karppinen & Aitta, 1986), se define como el valor que debe ser superado por la velocidad relativa entre el punto de análisis, sin que se presenten fallas por fisura.

Sin embargo, este proyecto se enfoca en la comodidad de los pasajeros, de manera que el valor de la velocidad crítica sea menor. Lamentablemente, no parece haber suficiente información para definir este criterio. La ecuación a continuación definida por Ochi, está determinada por:

$$u_{oc} = 0.093\sqrt{g/L}, \text{ Ecuación 15}$$

donde, g es la aceleración y L la eslora entre perpendiculares. En el presente caso produce un valor de $u_{oc} = 1.54 [m/s]$.

En contraste a la fórmula de Ochi para velocidad crítica, Aertssen (Karppinen & Aitta, 1986) considera que existe una correlación entre la frecuencia de slamming descrita por la teoría de Ochi y los resultados obtenidos mediante pruebas al MV Jordeans seakeeping (Karppinen & Aitta, 1986). Dicho autor establece la siguiente expresión para velocidad crítica:

$$u_{ae} = 0.143\sqrt{g/L}, \text{ Ecuación 16}$$

En el presente caso de análisis se obtuvo una velocidad crítica de $u_{ae}=2.36 [m/s]$.

Sin embargo, algunos autores precisan que estas fórmulas pueden predecir valores muy altos ó bajos para embarcaciones rápidas. Uno de los factores que influyen en la ocurrencia de impacto en la estructura transversal de un catamarán es el ángulo entre esta estructura y la superficie en el punto de impacto. Por lo cual, en el año 1974 Canolly (Karppinen & Aitta, 1986) agregó una corrección a la fórmula establecida por Ochi, considerando el ángulo con que las olas impactan el punto de análisis. Una expresión para calcular la velocidad crítica considerando la corrección está dada por la siguiente ecuación:

$$u = 4.56\sqrt{gd/k}, \text{ Ecuación 17}$$

donde, d : calado, $k = \frac{\pi^2}{4}(\cot \beta)^2$, β es el ángulo de astilla muerta de la sección transversal donde está ubicado el punto de análisis. En el presente caso con un calado de 1.25 [m] y $\beta=45^\circ$ se obtiene $\mu = 10.17(m/s)$.

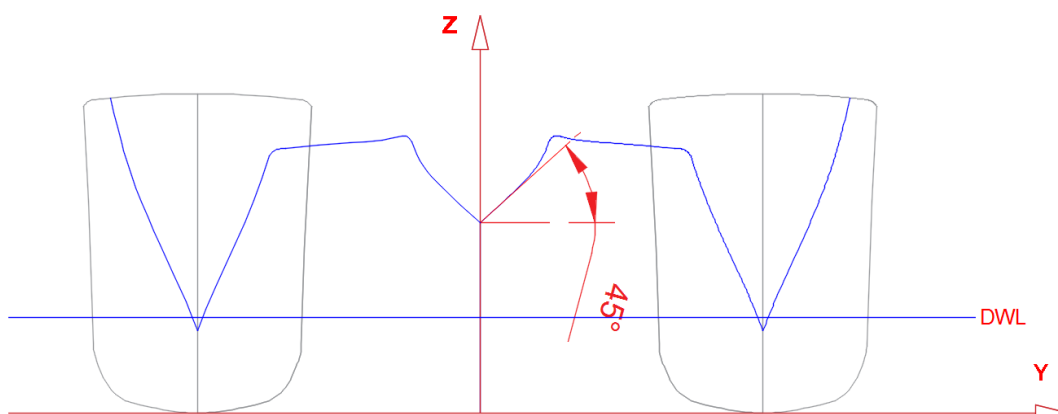


Figura 2.1: Geometría de la estructura transversal en el punto de análisis

Momentos del espectro de la velocidad relativa

Aplicando la ecuación para calcular los momentos espectrales presentada en el subcapítulo 2.1, se obtienen los siguientes resultados para la velocidad relativa y la superficie de la ola:

Unidades	m_o , [m ² /s ²]
Estado de mar 3	
C1 - 8 nudos	0.00
C1 - 10 nudos	0.66
C2 - 8 nudos	0.21
C2 - 10 nudos	0.71
Estado de mar 4	
C1 - 8 nudos	0.42
C2 - 8 nudos	0.41
C1 - 10 nudos	1.62
C2 - 10 nudos	1.63

Tabla 2.4: Momento del Espectro de Respuesta de la Velocidad Relativa.

Probabilidad de que la velocidad relativa supere el valor crítico.

Al igual, que el cálculo de movimiento relativo, la distribución de Rayleigh permite aproximar la función densidad de los máximos de la velocidad relativa. Con esta función se puede evaluar la probabilidad de que la velocidad relativa proa/ola supere la velocidad crítica $\mu=10.17 [m/s]$ determinada por Canolly:

$$P(U>\mu) = \exp(-\mu^2/(2m_0)), \text{ Ecuación 18}$$

Velocidad 8 (Nudos)		
Estado de mar	Condición	Probabilidad ($U \geq u$)
3	1	0.000
3	2	0.000
4	1	0.000
4	2	0.000
Velocidad 10 (Nudos)		
Estado de mar	Condición	Probabilidad ($U \geq u$)
3	1	0.000
3	2	0.001
4	1	0.049
4	2	0.041

Tabla 2.5: Probabilidad de exceder la velocidad crítica ($\mu=10.17 m/s$).

Con la probabilidad de ocurrencia de impacto y la frecuencia con la que el agua alcanza la estructura que une a los semicascos se calcula el número veces por hora que la superficie de la ola produce impactos en el punto de análisis.

Velocidad 8 (Nudos)					
Estado de mar	Condición	Probabilidad ($Z \geq z_{sb}$)	Probabilidad ($U \geq u$)	Probabilidad combinada	N
3	1	0.003	0.000	0.000	0
3	2	0.001	0.000	0.000	0
4	1	0.067	0.000	0.000	0
4	2	0.058	0.000	0.000	0
Velocidad 10 (Nudos)					
3	1	0.037	0.001	0.000	0
3	2	0.032	0.001	0.000	0
4	1	0.282	0.049	0.014	16
4	2	0.263	0.041	0.011	12

Tabla 2.6: Probabilidad de impacto en el punto de análisis ($\mu=10.17$ m/s).

El mayor número de impactos hidrodinámicos que causan golpes (slams) es 16 para la máxima velocidad máxima de la embarcación y operando en estado de mar 4, analizados para la condición 1.

2.3 Discusión de resultados

La velocidad crítica calculada en el subcapítulo 2.2 (Maxsurf Motion , 2013) sirve para evaluar la probabilidad de daño estructural. En el caso de molestias a pasajeros probablemente este valor sea menor pero no se pudo encontrar otros valores de referencia. Sin embargo, en la Tabla 2.7 se presentan valores límites para evaluar la probabilidad de daño estructural de un monocasco y un catamarán tipo Swath (North Atlantic Treaty Organization (NATO), 2000).

Frecuencia de Impacto		
Tipo de casco	Límite	Ubicación
Monocasco	20/hora	hacia proa
Swath	20/hora	estructura de unión de los semicascos

Tabla 2.7: Criterios límites de la frecuencia de impacto.

De acuerdo con los datos obtenidos para la probabilidad de impacto en la estructura de conexión que une a los semicascos a una velocidad crítica de $u=10.17 \text{ m/s}$ (Tabla 2.6) y considerando el límite dado por NATO (Tabla 2.7), los resultados se encuentran por debajo del valor límite y por lo tanto la estructura de conexión no presentaría daños por fisura. Sin embargo, los valores límites establecidos por NATO son aplicables para análisis de daño estructural y no para evaluar la comodidad de los pasajeros. Se ha realizado una búsqueda bibliográfica sobre valores límites que permitan evaluar la influencia del impacto generado por las olas en la comodidad de los pasajeros, pero no se ha encontrado algún valor límite que permita evaluar este efecto.

Para obtener la probabilidad de impacto es necesario conocer el valor de la velocidad crítica, sin embargo en la revisión bibliográfica se han encontrado tres expresiones para calcular dicho valor Ecuaciones 15 - 16- 17. Se puede notar en la Figura 2.2 que existe una diferencia considerable entre los resultados obtenidos para cada una de estas expresiones.

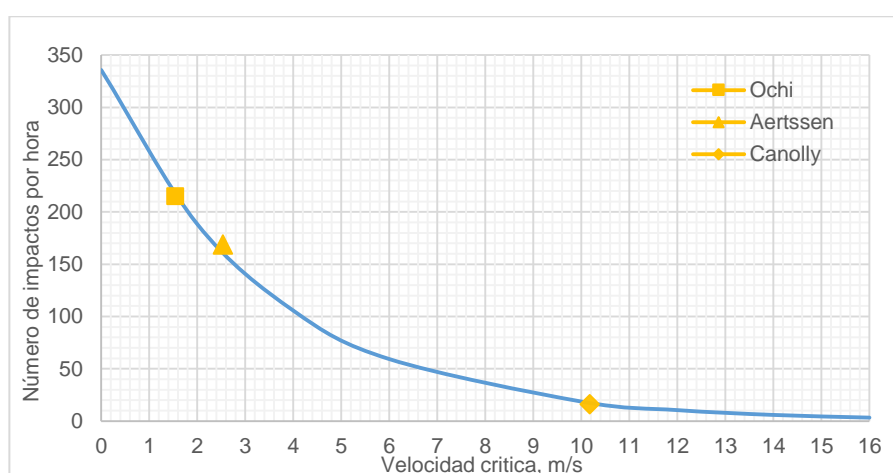


Figura 2.2: Frecuencia de impacto en la estructura de conexión de los semicascos en función de la velocidad crítica.

Por lo cual, podemos decir que no existe algún método que permita evaluar de manera confiable la frecuencia de impacto, considerando que la expresión para obtener la velocidad crítica difieren considerablemente entre ellas.

CAPÍTULO 3

3. Evaluación del confort de los pasajeros por índice de malestar por movimiento

Los buques son sistemas elásticos susceptibles a vibración sometidos a fuerzas periódicas procedentes de diferentes fuentes y su respuesta puede causar discomfort a los pasajeros. Existen criterios para evaluar los niveles de vibración que causan molestias a los pasajeros, teniendo tres áreas de análisis (International Organization for Standardization 2631 - 1, 2004):

- i) Límites de vibración para tripulación y pasajeros
- ii) Límites de vibración para estructuras locales
- iii) Límites de vibración para maquinaria

Los límites de vibración mencionados son inducidos tanto mecánicamente como por el movimiento del mar. En el desarrollo de este proyecto, se evalúan los niveles de vibración inducidas por el movimiento del mar, teniendo como efecto inmediato la aceleración vertical del buque. La aceleración vertical causa malestar por movimiento en el cuerpo humano la cual puede ser evaluada mediante la norma ISO 2631 - 1. Sin embargo, la principal limitación de la norma ISO 2631– 1 es asumir que las aceleraciones verticales en el centro de gravedad son representativas en todo el buque y que se puede usar en un periodo de onda representativo en lugar de una onda real (Fossen, 2011). En muchos casos, es ventajoso evaluar el porcentaje de personas que se marean a bordo mediante la estimación de McCauley y O'Hanlon (O'Hanlon & Michael, 1973), lo cual nos da predicciones más precisas.

3.1 Oscilación inducida por olas – ISO 2631-1

Los principales factores que miden los posibles efectos de vibración en la salud, el confort, la percepción y malestar por movimiento están especificados por rangos de frecuencia:

- 0.5 Hz a 80 Hz para la salud, el confort y la percepción,
- 0.1 Hz a 0.5 Hz para la enfermedad por movimiento.

El valor RMS de la aceleración con frecuencia ponderada permite evaluar los criterios de discomfort en los pasajeros a bordo de un buque. Estos criterios se basan en la Norma ISO 2631-1, los cuales establecen el nivel máximo de aceleración RMS ponderada para el confort de los pasajeros a bordo.

La forma en que la vibración afecta la salud, el confort, la percepción y el malestar por movimiento dependen de las diferentes ponderaciones de frecuencia que se dé para cada eje de vibración, mostrados a continuación:

Frecuencia ponderada	Salud	Confort	Percepción	Molestar por movimiento
w_k	Eje Z (sentado)	Eje Z (sentado) Eje Z (parado)	Eje Z (sentado) Eje Z (parado)	
w_d	Eje x(sentado) Eje y(sentado)	Eje x(sentado) Eje y(sentado) Ejes x,y acostado	Eje x(sentado) Eje y(sentado) Ejes x,y acostado	
w_f				vertical

Tabla 3.1: Guía para la aplicación de las curvas de frecuencia ponderada

Fuente: (International Organization for Standardization 2631 - 1, 2004)

La ponderación de frecuencia utilizada para la predicción de efectos de vibración de malestar por movimiento es w_f . Esta ponderación se aplica multiplicando el factor k como se indican a continuación:

Eje x ubicado en los pies, $w_i: k = 0.25$

Eje y ubicado en los pies: $w_i, k = 0.25$

Eje z ubicado en los pies: $w_i, k = 0.40$

En este trabajo se considera, un factor de $k=0.4$ para considerar el efecto de la aceleración en dirección vertical (International Organization for Standardization 2631 - 1, 2004).

El valor RMS de la aceleración con frecuencia ponderada (Frequency Weighting) se calcula mediante la función densidad espectral de la aceleración vertical en la posición de análisis, en un rango de un tercio de la octava² de la frecuencia de interés:

$$a_w = \left[\sum_i \omega_i^* S_i \right]^{1/2}, \text{ Ecuación 19}$$

donde,

a_w : aceleración ponderada de la frecuencia.

ω_i : factor ponderado para 1/3 de la octava en un rango de frecuencias, $k=0.4\omega_e$

S_i : espectro de la aceleración vertical para un rango de frecuencias de 1/3 de la octava, $2/3 * S_a$.

Criterios de evaluación RMS de la aceleración

Los criterios para evaluar el confort de los pasajeros, por un determinado tiempo de exposición de los pasajeros en el mar está dado por (International Organization for Standardization 2631 - 1, 2004):

² La octava es una banda de frecuencia que está entre dos frecuencias con una relación de dos. Por lo tanto, 1/3 de la octava representa 2/3 de la frecuencia de encuentro.

$$a_z(t, \omega_e) = \begin{cases} 0.5\sqrt{2/t} & \text{para } 0.1\text{Hz} < \frac{\omega_e}{2\pi} \leq 0.315\text{Hz} \\ 0.5\sqrt{2/t} * 6.8837 \left(\frac{\omega_e}{2\pi}\right)^{1.67} & \text{para } 0.315 \leq \frac{\omega_e}{2\pi} \leq 0.63\text{Hz} \end{cases}, \text{ Ecuación 20}$$

donde,

t : tiempo de exposición de los pasajeros a bordo

ω_e : frecuencia de encuentro entre el buque y la ola

a_z : valore RMS de la aceleración vertical

En este proyecto, se evalúa el malestar por movimiento de los pasajeros sometidos a movimientos constantes durante un periodo de tiempo entre 30 minutos a 4 horas, dado que en el trayecto puede tomar diferentes tiempos de navegación. Los valores límites de aceleración vertical para cada tiempo de análisis se presentan en la Figura 3.1.

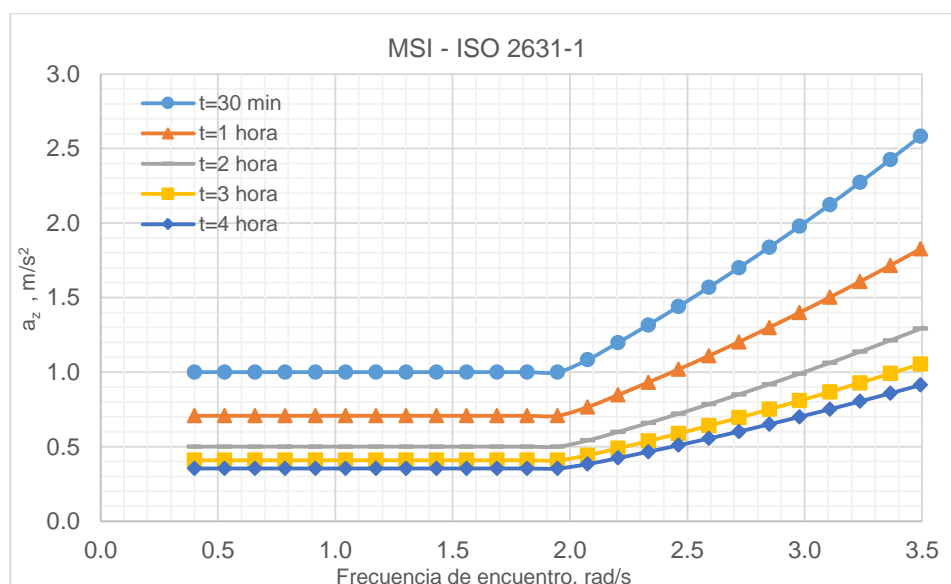


Figura 3.1: Límites de evaluación de la aceleración vertical para diferentes tiempos de exposición de los pasajeros en el mar.

Según la norma, conforme el tiempo de exposición es mayor, el valor de la aceleración que causa disconfort en los pasajeros es menor.

3.2 Cálculo de la aceleración vertical RMS

La aceleración vertical combinada con los diferentes movimientos del buque es el principal parámetro que permite evaluar el confort de los pasajeros bordo. A partir, del espectro de la aceleración vertical en el punto de análisis, integrado sobre 1/3 de la banda octava centrado en la frecuencia interés, se encuentra una expresión para determinar la aceleración vertical:

$$a_w = \int_{\omega_{e1}}^{\omega_{e2}} S_{ac.ver}^+(\omega_e) d\omega_e, \text{ Ecuación 21}$$

donde,

$S_{ac.ver}^+$: aceleración vertical absoluta en la posición de análisis

ω_{ei} : 1/3 de la banda octava centrado en la frecuencia de interés

a_w : valor RMS de la aceleración

A continuación, se presenta los valores RMS de la aceleración para cada una de las posiciones de análisis en un estado de mar 4, velocidad 10 nudos, condición de carga 2, y, dirección de ola entre 0 y 180 grados.

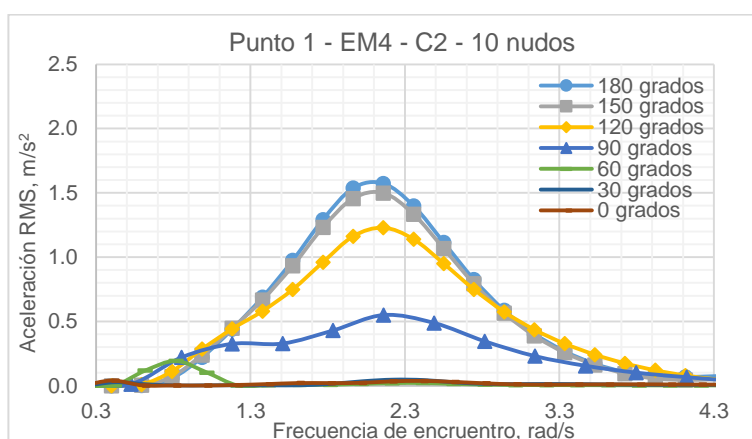


Figura 3.2: Aceleración RMS para el punto de análisis 1.

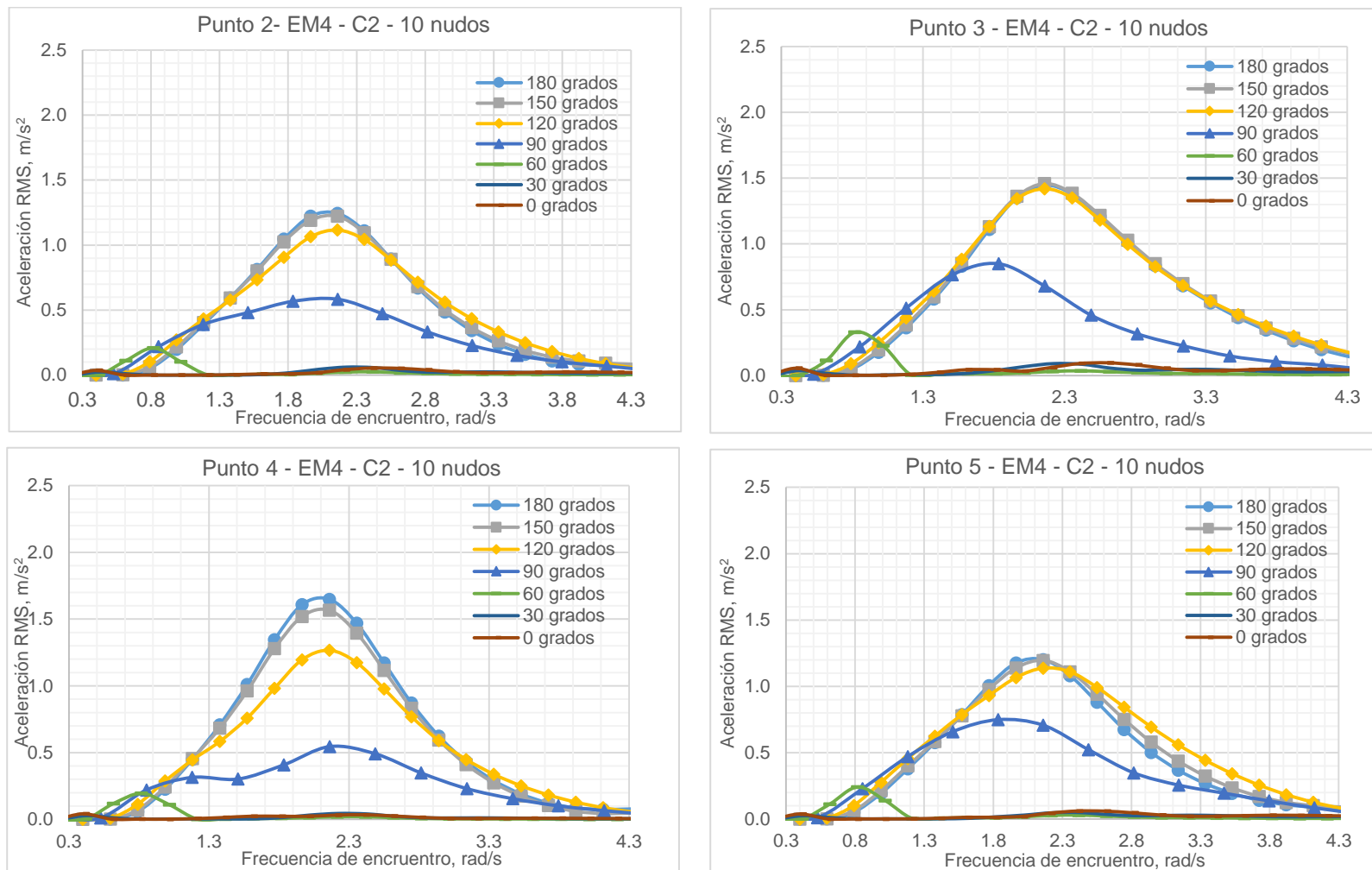


Figura 3.3: Aceleración RMS para los puntos de análisis 2, 3, 4 y 5.

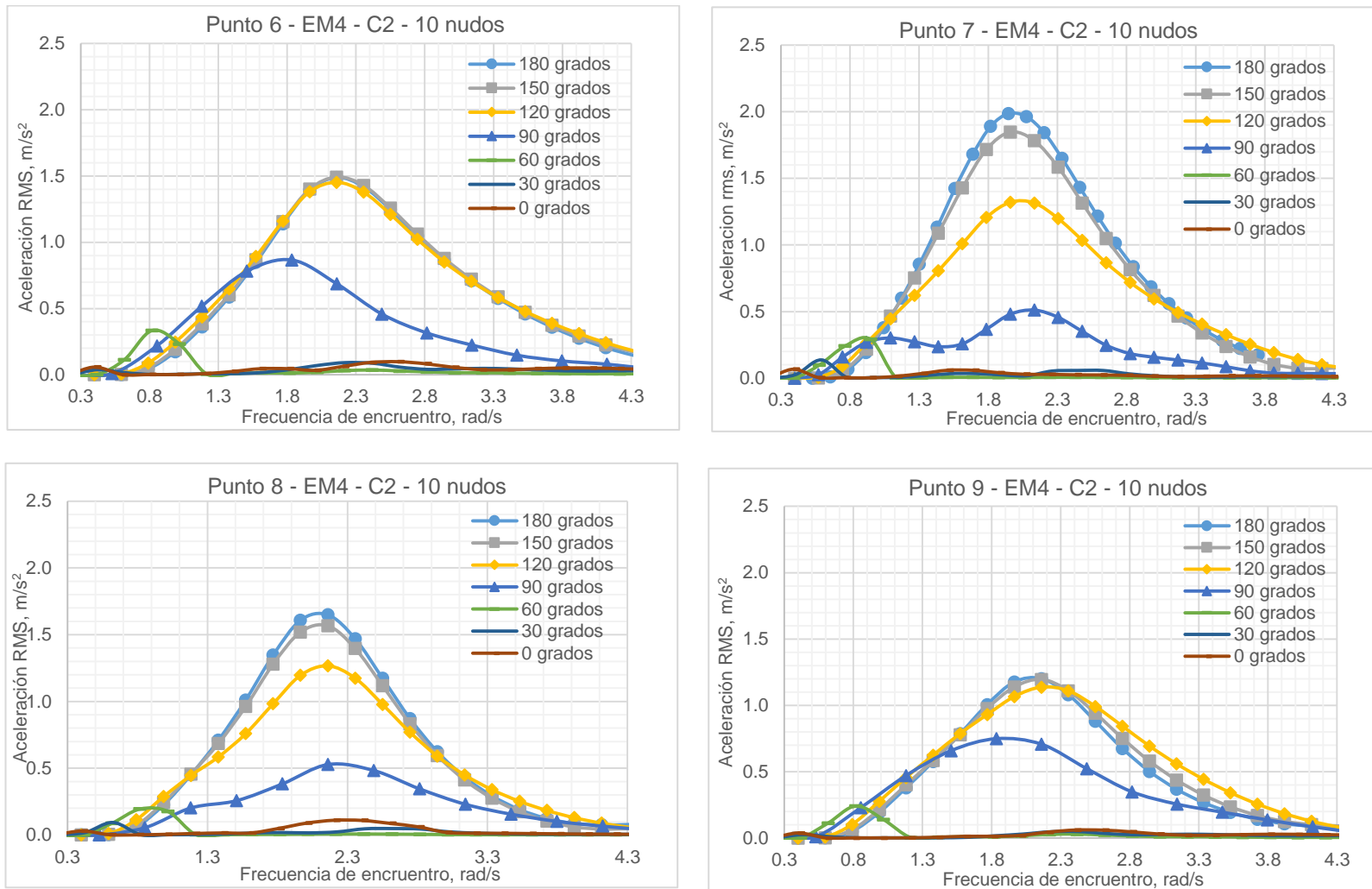


Figura 3.4: Aceleración RMS para los puntos de análisis 6, 7, 8 y 9.

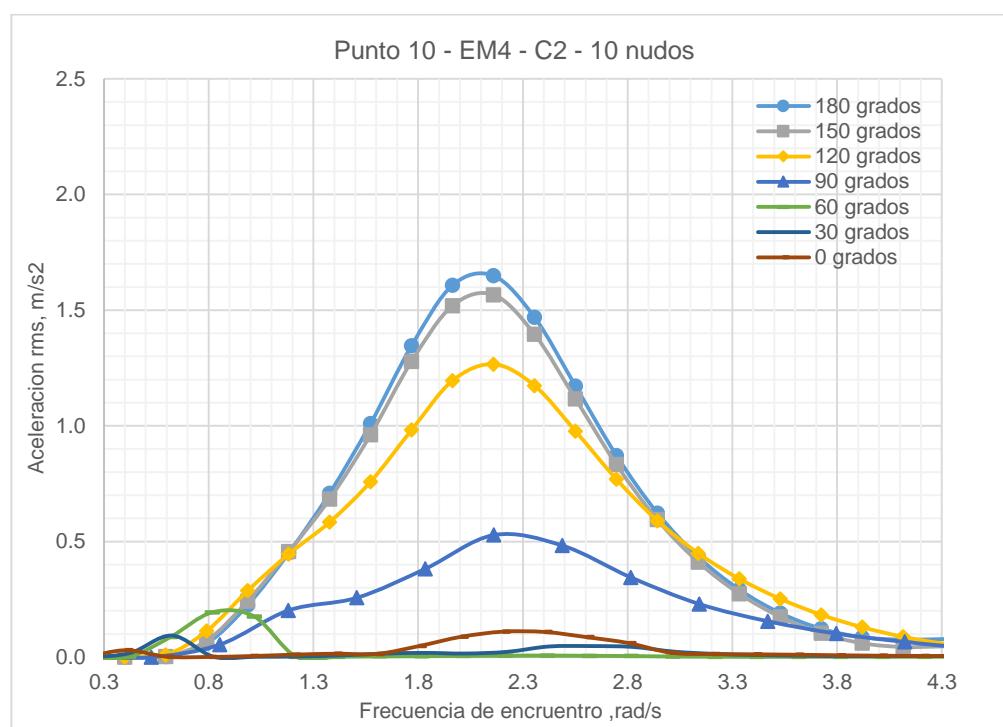


Figura 3.5: Aceleración RMS para el punto de análisis 10.

Como se puede notar en las Figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 los ángulos de encuentro olas – buque que poseen aceleración mayor a 0.35 m/s^2 corresponden a las direcciones de olas de $\beta=90^\circ$, $\beta=120^\circ$, $\beta=150^\circ$ y $\beta=180^\circ$.

A continuación, se grafica la aceleración RMS para direcciones de ola desde 90 a 180 grados para estados de mar 3 y 4 en la condición de carga 2.

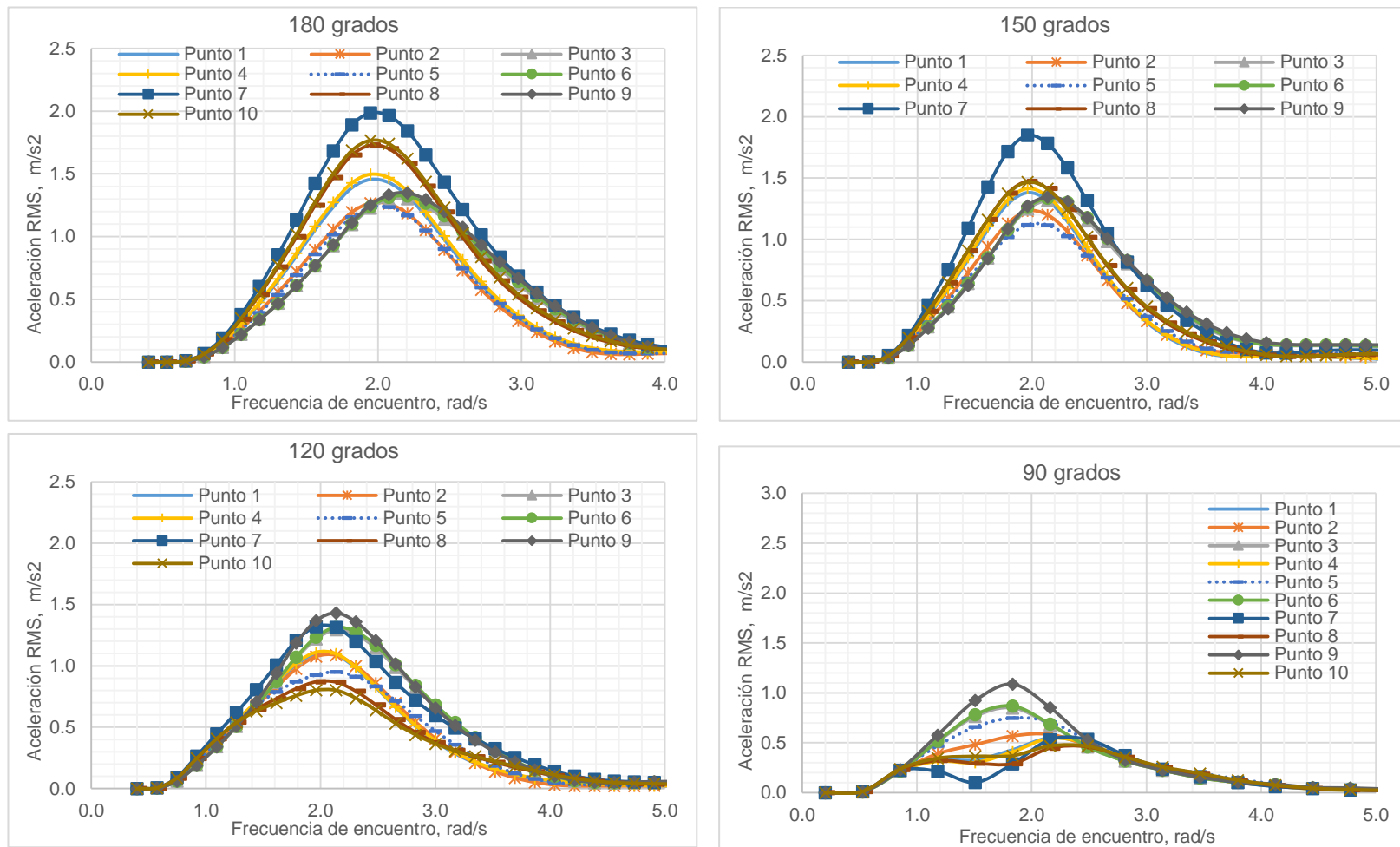


Figura 3.6: Aceleración RMS para estado de mar 4 con direcciones de olas entre 90 y 180 grados condición 2 velocidad 10 nudos.

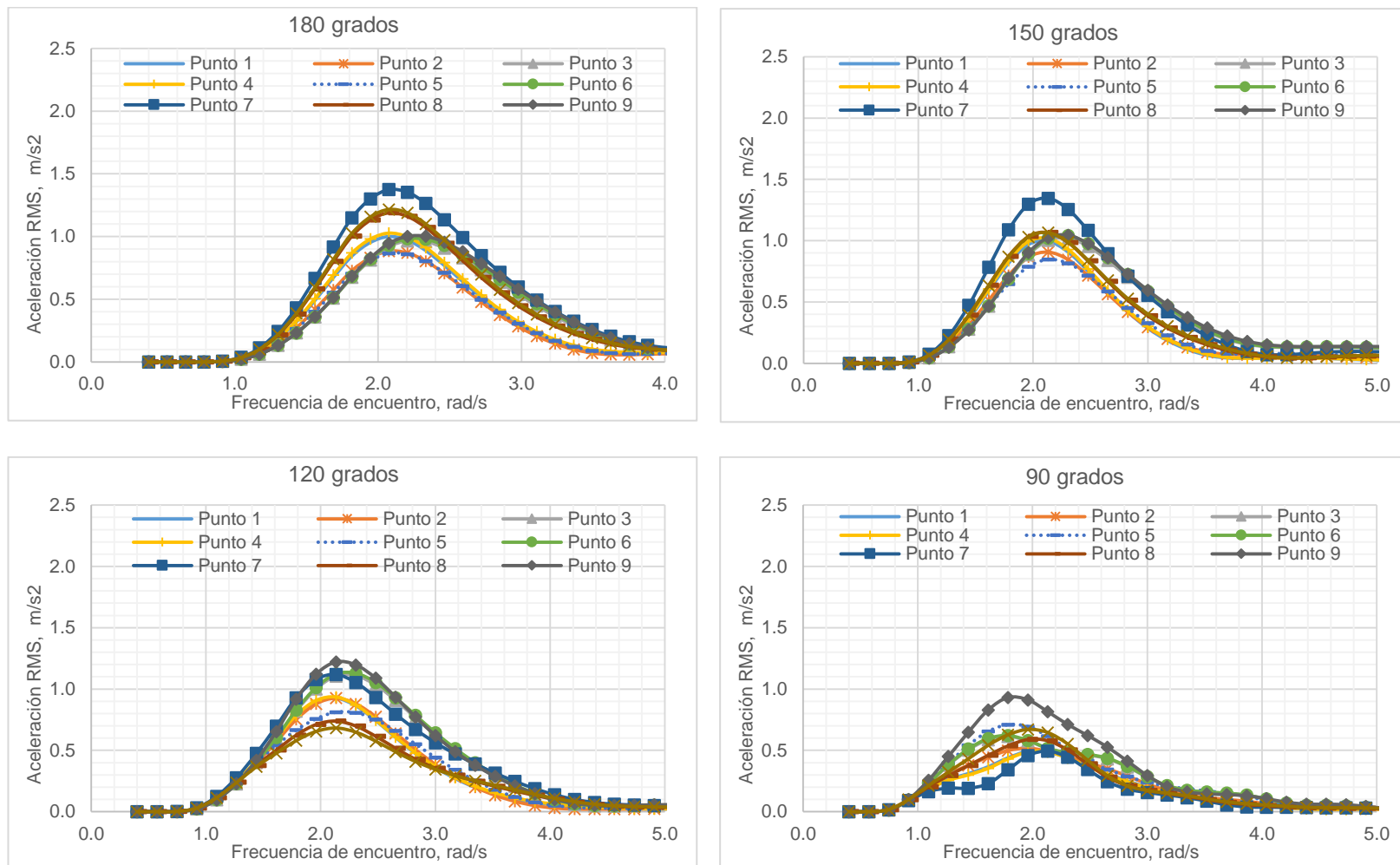


Figura 3.7: Aceleración RMS para estado de mar 3 con direcciones de olas entre 90 y 180 grados para la condición 2 velocidad 10 nudos

Los valores de mayor aceleración vertical en el buque ocurren para olas de proa ($\beta=180^\circ$), en un estado de mar 4. A medida que la posición del punto de análisis se aleja de la sección media del catamarán, el valor de la aceleración vertical RMS aumenta por la influencia de la rotación del buque. Para direcciones de olas entre 120 a 180 grados se considera la posición del punto de análisis en sentido longitudinal, mientras que para olas de costados se considera la posición del punto en sentido transversal.

En la Figura 3.6 y 3.7 se puede verificar que para direcciones de olas entre 120 a 180 grados el punto 7 (ubicado en la proa del buque) desarrolla mayor aceleración vertical 2.6 m/s^2 , mientras que para olas con dirección 90 grados, el punto 9 (ubicado en el costado) del buque posee la mayor aceleración vertical 1.0 m/s^2 . Sin embargo, las olas de costado no representan molestias considerables en los pasajeros en comparación con las olas de proa.

3.3 Evaluación del confort de los pasajeros con los criterios ISO 2631-1

Una vez calculada la aceleración vertical, se evalúa el confort aplicando los criterios ISO 2631 – 1 para olas de proa y costado en los diferentes estados de mar. Para ello se grafican simultáneamente los niveles estimados de respuesta y los niveles máximos permisibles.

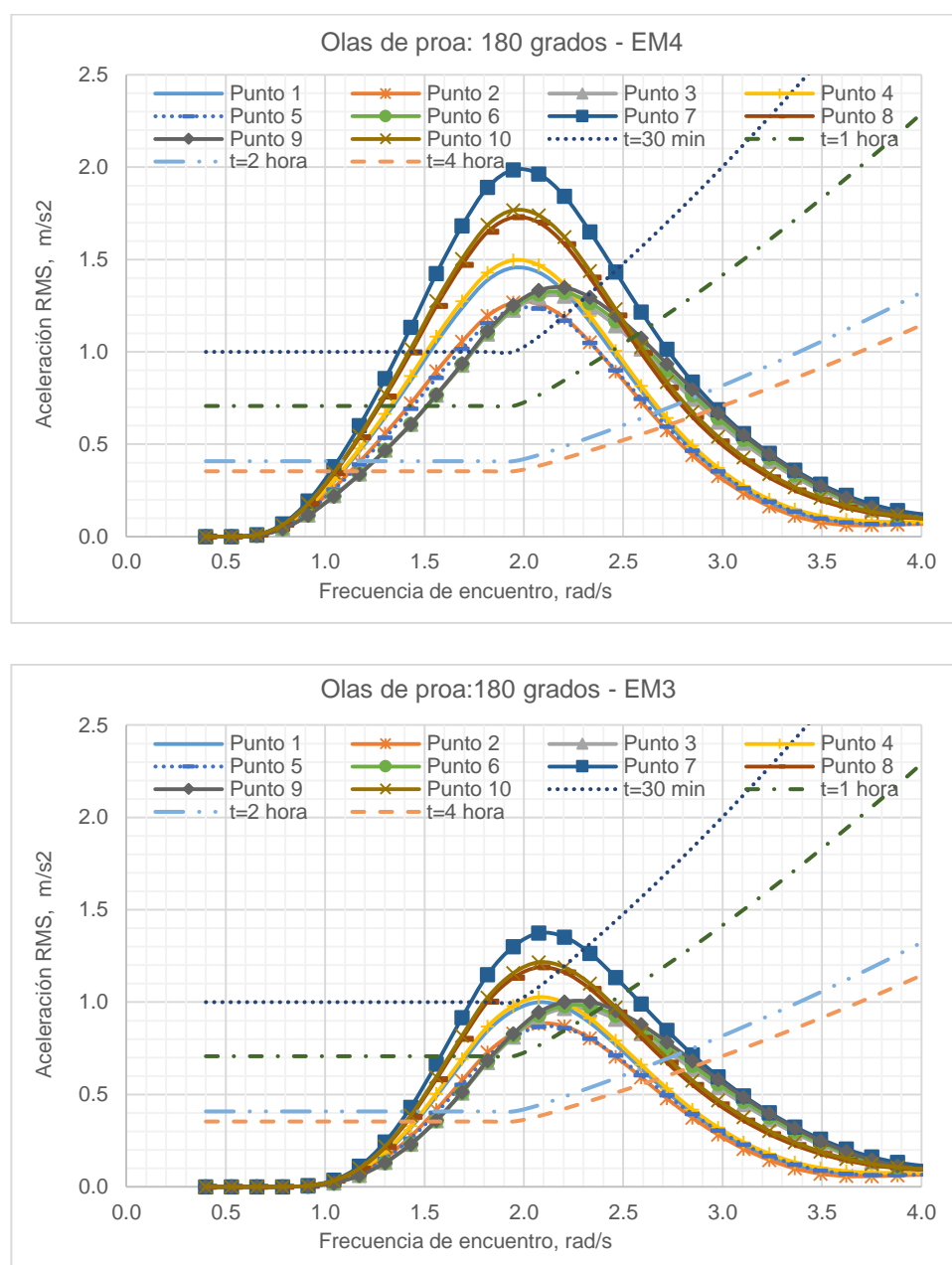


Figura 3.8: Evaluación de la Norma ISO 2631-1 para olas de proa condición 2 velocidad 10 nudos.

Para el estado de mar 4, todos los puntos de análisis presentan molestias para diferentes rangos de frecuencia en los tiempos de exposición analizados (0.5, 1, 2, 3, 4 horas). Mientras que, para el estado de mar 3 a un tiempo de exposición de 30 min

los puntos que presentan molestias son: 7, 8, 10, 1 y 4, pero para tiempos de exposición mayores entre 1 y 4 horas todos los puntos presentan molestias. Como es lógico, el rango de frecuencias en que se producen las molestias a bordo para el estado de mar 3 es considerablemente menor que al estado de mar 4.

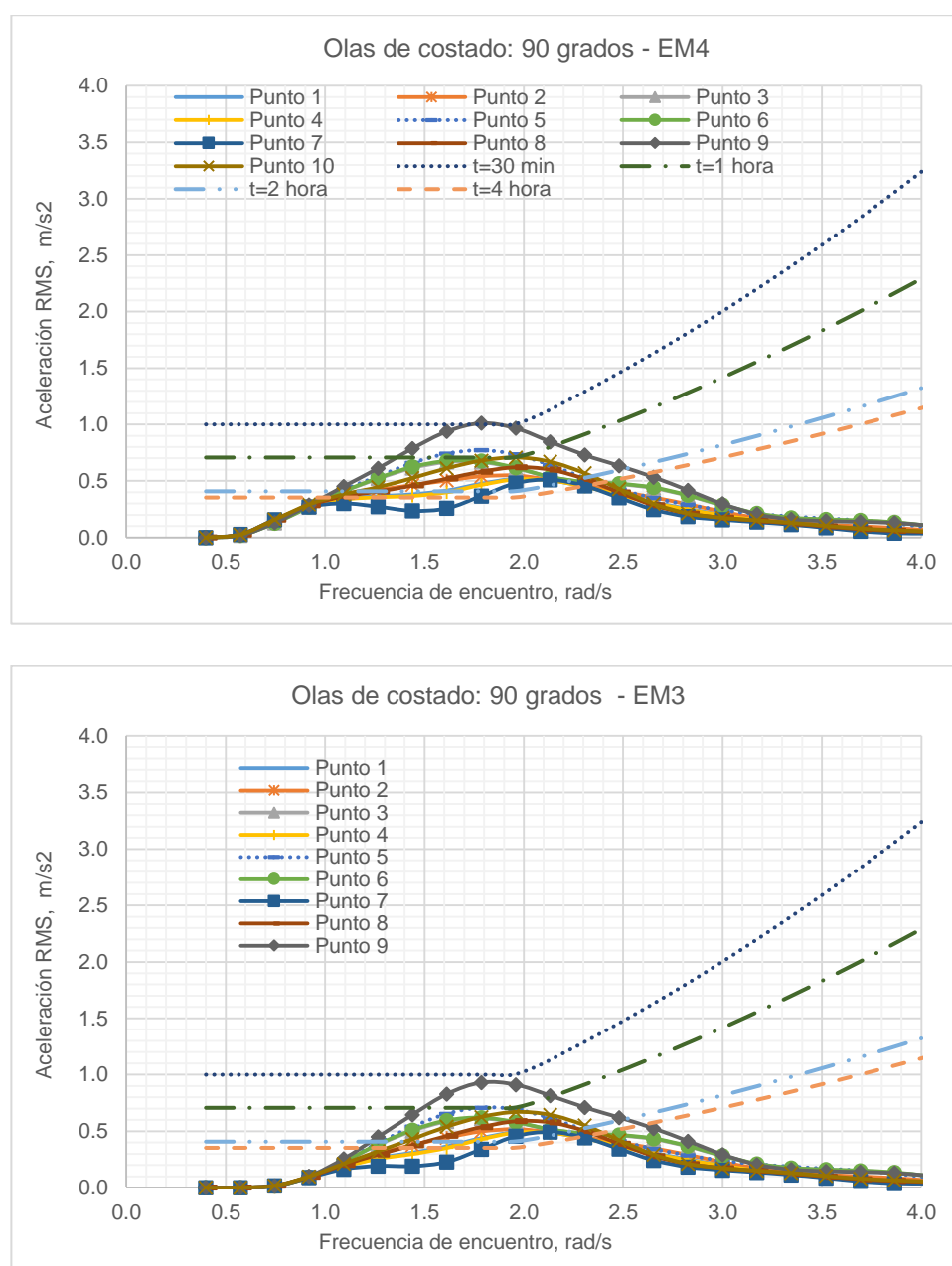


Figura 3.9: Evaluación de la Norma ISO 2631-1 para olas de costado condición 2 velocidad 10 nudos.

Analizando el punto 9 para 1 hora de exposición a movimientos constantes, el rango de frecuencias para el cual los pasajeros presentan molestias a bordo está dado por 1.4 - 2.1 rad/s para estado de mar 4 y 1.6 - 2.0 rad/s para estado de mar 3. Con lo cual, se puede indicar que para olas de costado no existe una diferencia considerable en la evaluación del confort para estados de mar 3 y 4.

Para un tiempo de exposición de 30 min el punto 9 presenta molestias a bordo, mientras que para un rango de tiempo entre 1 a 4 horas los puntos 9, 6, 3 y 5.

3.4 Evaluación del confort con los pasajeros por índice de malestar por movimiento

La limitación principal del criterio ISO 2631 – 1 es que solo predice la superación del 10% del valor MSI y asume que las aceleraciones en el centro de gravedad son representativas en todo el buque (Fossen, 2011). Sin embargo, la estimación de McCauley y O'Hanlon (O'Hanlon & Michael, 1973) permite medir cuantitativamente el porcentaje de personas que presentan malestar por movimiento luego de 2 horas de exposición a movimiento estacionario. Asumiendo que los valores de mayor aceleración son representativas en el centro de gravedad, en esta parte del proyecto se evalúa el valor MSI en el punto 2 (descrito en el capítulo 1). La estimación está dada por la siguiente ecuación (Fossen, 2011):

$$MSI = 100 * erf \left\{ \frac{\log \left(\frac{a_w}{g} \right) - \mu_{MSI}}{0.4} \right\}, \text{ Ecuación 22}$$

donde:

a_w = valor RMS de la aceleración vertical

$$\mu_{MSI} = -0.819 + 2.32 (\log \omega_e)^2$$

ω_e = frecuencia de encuentro

erf = es la función de distribución normal acumulativa hasta x , para una distribución normal con media cero y desviación estándar uno (en Excel está expresión está dada por $DISTR.NORM.N(x;0;1;VERDADERO)$).

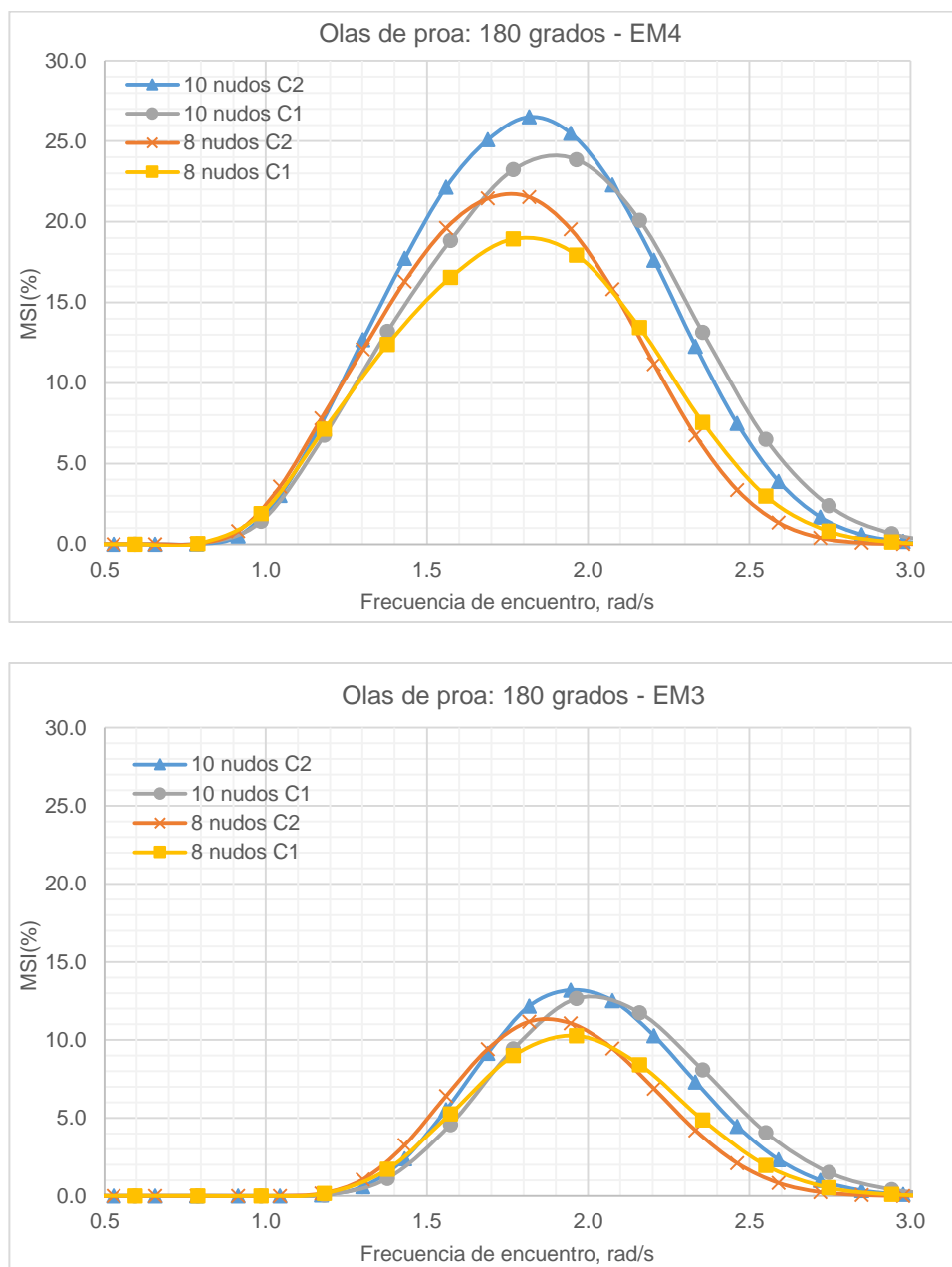


Figura 3.10: Índice de malestar por movimiento para olas de proa, punto 2.

En buques de pasajeros se espera que el número de pasajeros que se marean a bordo sea menor al 10 o 20 % (Edward V. Lewis (SNAME), 1988). Sin embargo, el índice de malestar por movimiento indicado en la Figura 3.10 supera en ambas condiciones de análisis el porcentaje de malestar por movimiento del 10%.

Si se considera que el índice de malestar por movimiento no debe superar el 20% de las personas que se marean a bordo, en el estado de mar 4 el porcentaje de malestar por movimiento es superado a excepción de la condición 1 para 10 nudos de velocidad. En el estado de mar 3 los pasajeros a bordo no presentarían malestar alguno, considerando que estos valores no sobrepasan el 20%.

CAPÍTULO 4

4. Influencia del bulbo de proa en el confort de los pasajeros

4.1 Definición de formas con bulbo

Un bulbo de proa se diseña principalmente para reducir la resistencia al avance. Sin embargo, se han encontrado otras ventajas adicionales entre las que se cuenta la mejora en la respuesta del buque en olas. Considerando los aspectos mencionados, se adaptó un bulbo de proa para los semicascos del catamarán, a fin de evaluar su influencia en el confort de los pasajeros. A continuación, se presenta la geometría del bulbo:

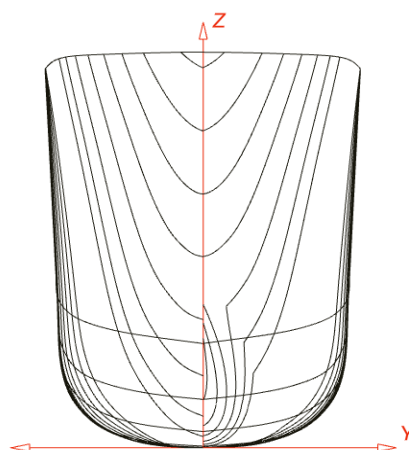


Figura 4.1: Sección transversal del modelo con bulbo y sin bulbo.

Dimensiones generales del bulbo de proa		
Área transversal del bulbo(S_{a20})	0.66	(m^2)
Manga del bulbo(b)	0.91	(m)
Altura del bulbo(H)	0.68	(m)
Protuberancia del bulbo(x)	0.97	(m)
Altura máxima del bulbo (z)	1.70	(m)

Tabla 4.1: Geometría del bulbo de proa.



Figura 4.2: Modelo 3D del catamarán con bulbo.

Nuevos desplazamientos

En el subcapítulo 1.2 se definieron las condiciones de carga de la embarcación para el análisis de este proyecto. Sin embargo, considerando la adaptación de un bulbo de proa, las condiciones hidrostáticas deben ser modificadas. A continuación, se presentan las nuevas condiciones de carga:

Condición	Descripción	Calado m	Desplaz Ton	GM _T m	LCB m	LCF m
1	Máxima carga	1.36	121.97	14.87	0.11	-1.70
2	Llegada a puerto	1.24	105.34	15.73	0.36	-1.49

Tabla 4.2: Condiciones de carga del catamarán con bulbo.

Considerando la adición del bulbo de proa se puede notar en las curvas hidrostáticas del modelo sin y con la adaptación del bulbo (ver Anexo 1), que la posición del centro longitudinal de boyantez y de flotación se mueven ligeramente hacia proa. Con Las nuevas condiciones de carga y demás condiciones de análisis definidas en el subcapítulo 1.2, se obtienen los resultados equivalentes a los subcapítulos posteriores. En este capítulo se analizan las condiciones que presentaron problemas de incomodidad a bordo en el capítulo 2 y 3, esto es condición de carga 2(llegada a puerto) a velocidad 10 nudos y navegando en estados de mar 3 y 4.

4.2 Densidad probabilística de los parámetros de respuesta

Espectro de la respuesta de movimiento relativo

Una vez calculados los RAO'S de respuesta de interés Ecuación 2, y establecidos el espectro de olas incidentes calculados en el capítulo 1 Ecuación 6, se obtiene el espectro de la respuesta del movimiento relativo superficie - estructura de conexión Ecuación 4. A continuación, se presenta el espectro del movimiento relativo del cuerpo de conexión entre semicascos respecto de la elevación de la superficie de las olas para olas de proa Ecuación 7.

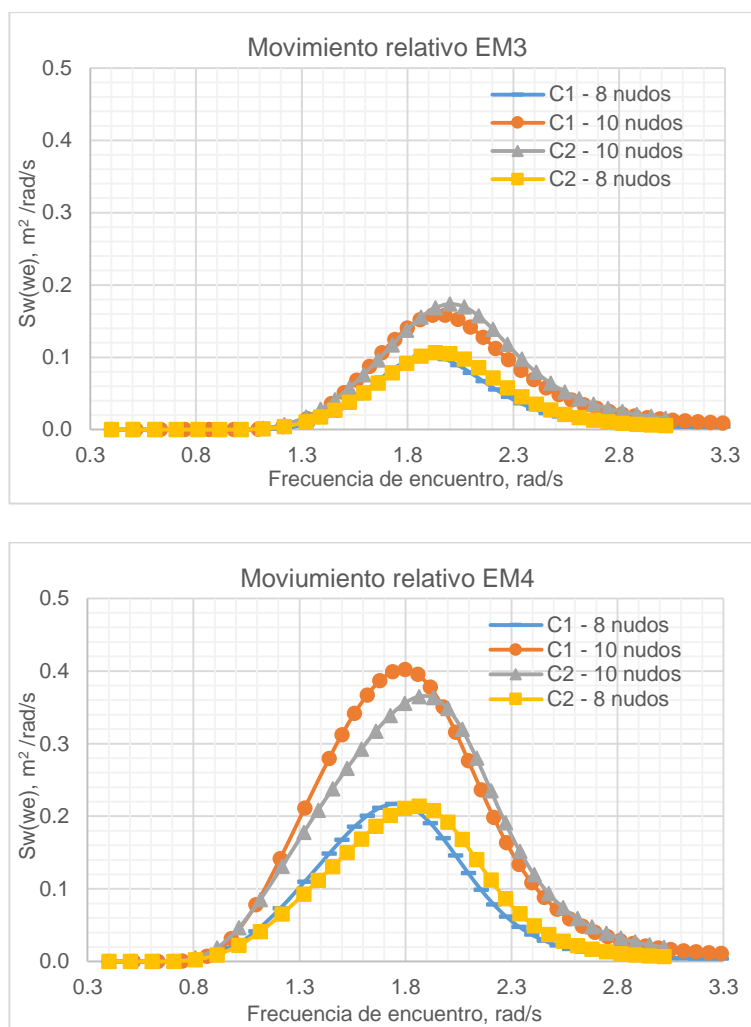


Tabla 4.3: Espectro del movimiento relativo para olas de proa.

Momentos del espectro m_0 , m_2 , m_4 del espectro

Integrando el área bajo la curva del espectro del movimiento relativo proa – ola Ecuación 11, se obtienen los momentos espectrales.

Unidades	m_0 , [m ²]	m_2 , [m ² /s ²]	m_4 , [m ² /s ⁴]
Estado de mar 3			
C1 - 8 nudos	0.08	0.34	1.56
C1 - 10 nudos	0.15	0.66	3.32
C2 - 8 nudos	0.09	0.37	1.69
C2 - 10 nudos	0.16	0.70	3.39
Estado de mar 4			
C1 - 8 nudos	0.19	0.66	2.62
C2 - 8 nudos	0.21	0.73	2.96
C1 - 10 nudos	0.39	1.45	6.30
C2 - 10 nudos	0.39	1.45	6.17

Tabla 4.4: Momento del espectro de respuesta del movimiento relativo.

Asumiendo la función densidad probabilística de Rayleigh para los máximos locales Ecuación 12 y evaluando la frecuencia promedio Ecuación 13, se obtienen los siguientes resultados:

Estado de mar	Condición	Probabilidad ($Z \geq z_{sb}$)	$\bar{\tau}_{p.}$ (s)	N
Velocidad 8 (Nudos)				
3	1	0.00	2.92	1
3	2	0.00	2.95	1
4	1	0.05	3.15	60
4	2	0.05	3.13	58
Velocidad 10 (Nudos)				
3	1	0.02	2.80	29
3	2	0.02	2.85	26
4	1	0.24	3.02	289
4	2	0.20	3.04	245

Tabla 4.5: Número de veces por hora que la superficie de la ola sobrepasa el punto de análisis.

Espectro de la respuesta de la velocidad relativa

Multiplicando el espectro de la respuesta del movimiento relativo por la frecuencia de encuentro, se obtiene el espectro de la velocidad relativa:

$$S_v(\omega_e) = \omega_e S_w(\omega_e)$$

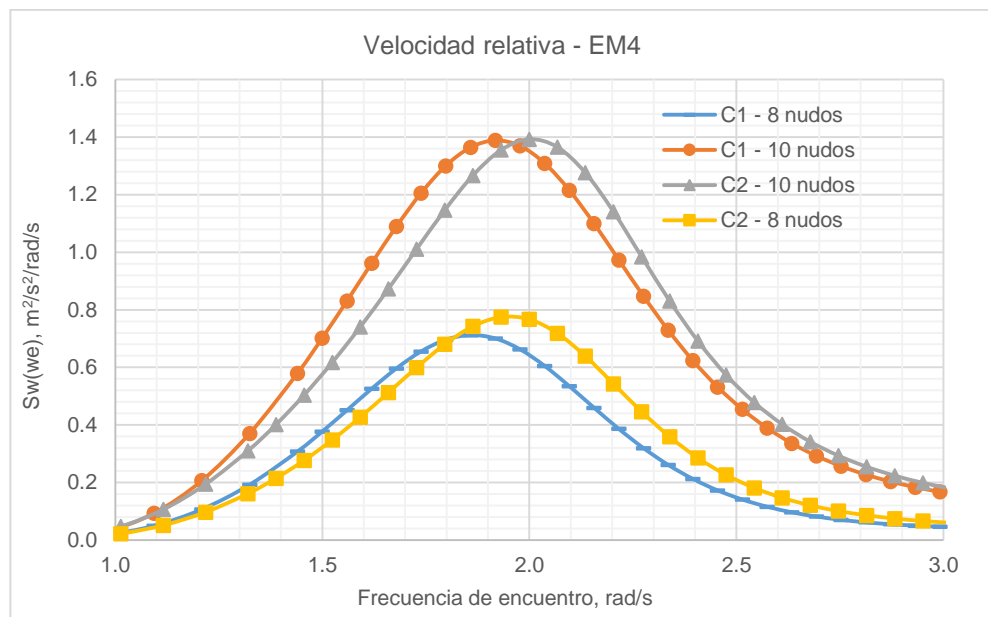
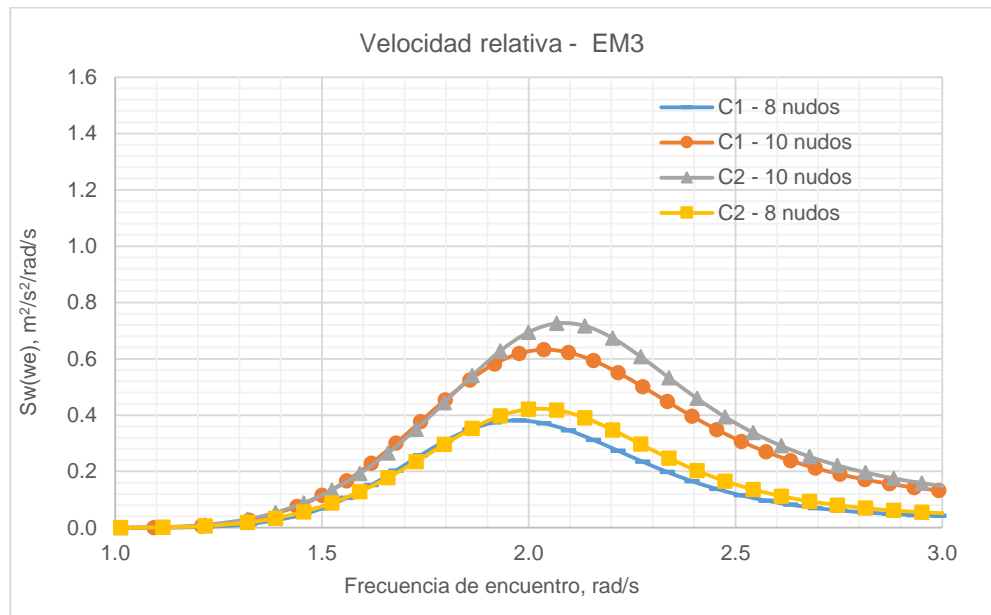


Figura 4.3: Espectro de la velocidad relativa para olas de proa.

Momentos m_0 , m_2 , m_4 del espectro de la velocidad relativa

Aplicando la ecuación 11 de momentos espectrales de la velocidad relativa definido en el subcapítulo 2.1 tenemos:

Unidades	$m_0, [m^2/s^2]$
Estado de mar 3	
C1 - 8 nudos	0.35
C1 - 10 nudos	0.66
C2 - 8 nudos	0.37
C2 - 10 nudos	0.70
Estado de mar 4	
C1 - 8 nudos	0.64
C2 - 8 nudos	0.74
C1 - 10 nudos	1.45
C2 - 10 nudos	1.42

Tabla 4.6: Momentos espectrales de la velocidad relativa

Considerando la velocidad crítica Ecuación 17 μ de 1.17 *m/s*, obtenida en el subcapítulo 2.2, se obtiene la probabilidad de impacto en la estructura de conexión (P11) definido en la Tabla 1.5 para dirección de olas de 180 grados:

Estado de mar	Condición	Probabilidad ($Z \geq z_{sb}$)	Probabilidad ($U \geq u_{sb}$)	Probabilidad conjunta	Nt
Velocidad 8 (Nudos)					
3	1	0.001	0.000	0.000	0
3	2	0.001	0.000	0.000	0
4	1	0.053	0.000	0.000	0
4	2	0.051	0.001	0.000	0
Velocidad 10 (Nudos)					
3	1	0.023	0.000	0.000	0
3	2	0.021	0.001	0.000	0
4	1	0.243	0.031	0.007	8
4	2	0.207	0.030	0.006	7

Tabla 4.7: Probabilidad de impacto en el punto de análisis para olas de proa.

4.3 Comparación de resultados del modelo con y sin bulbo

Frecuencia de impacto en la estructura de conexión

Evaluando los resultados obtenidos en el capítulo dos para el modelo sin bulbo Tabla 2.6 y los resultados obtenidos en este capítulo para el modelo con bulbo Tabla 4.7, se evalúa la diferencia entre ambos resultados detallados en la tabla a continuación:

Estado de mar	Condición	Sin bulbo	Con bulbo
Velocidad 8(nudos)			
3	1(cargada)	0	0
3	2 (ligera)	0	0
4	1(cargada)	0	0
4	2 (ligera)	0	0
Velocidad 10 (Nudos)			
3	1(cargada)	0	0
3	2 (ligera)	0	0
4	1(cargada)	16	8
4	2 (ligera)	12	7

Tabla 4.8: Frecuencia de impacto en la estructura de conexión del modelo con y sin bulbo.

Evaluación del confort con las normas ISO 2631 - 1

Los valores de máxima aceleración vertical se desarrollan cuando el buque navega con olas de proa ($\beta=180^\circ$) y para el estado de mar 4. A medida que la posición del punto de análisis se aleja de la sección media del catamarán, el valor de la aceleración vertical RMS aumenta. Sin embargo, las aceleraciones son representativas en el centro de gravedad del buque (Fossen, 2011). A continuación, se muestran las curvas para el valor RMS de la aceleración vertical del modelo con bulbo y sin bulbo para el punto 2 ubicado en sección media para dirección de ola de 180 grados en estados de mar 3 y 4.

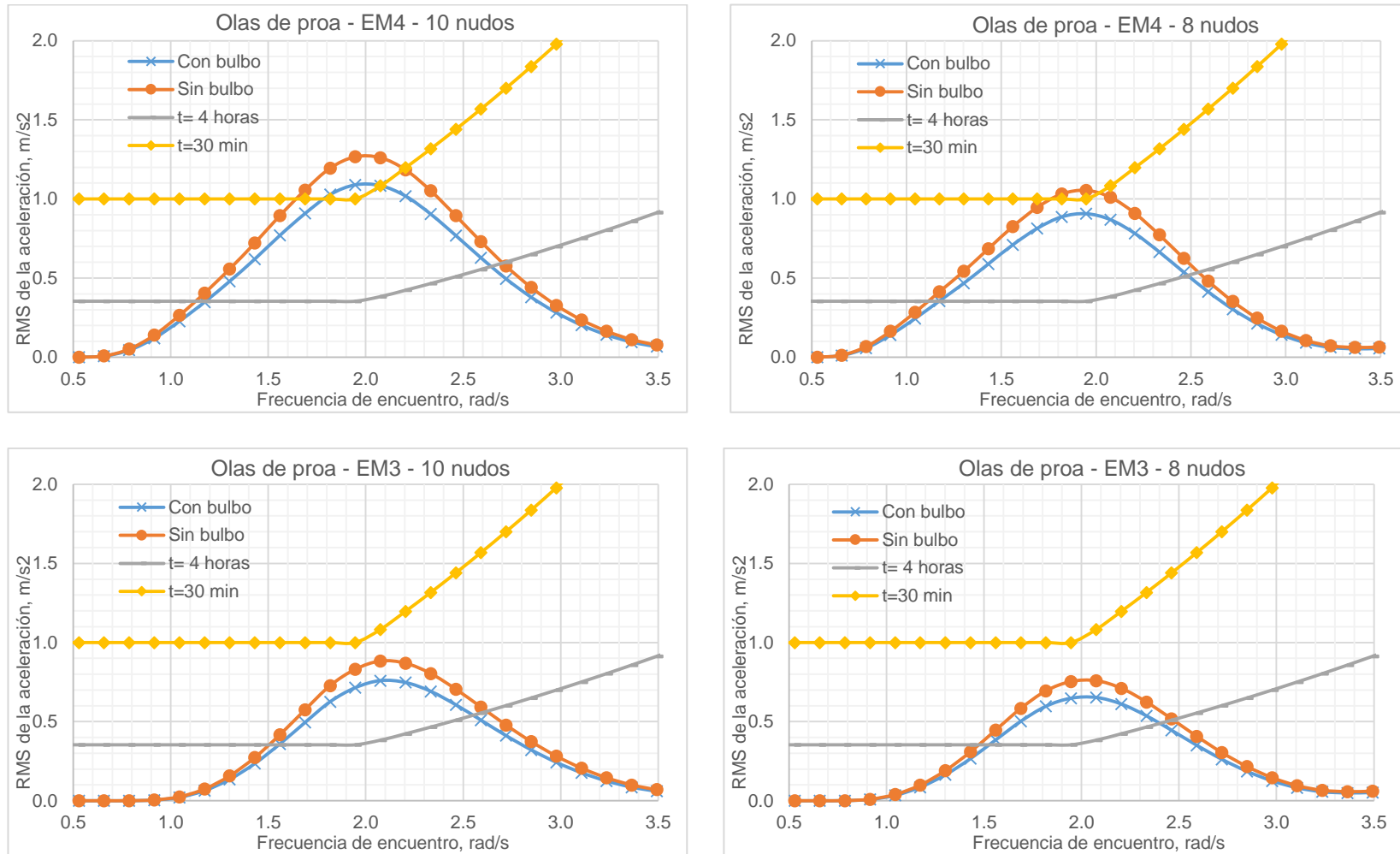


Figura 4.4: Valor RMS de la aceleración vertical para la condición de carga dos (Máxima carga) con olas de proa.

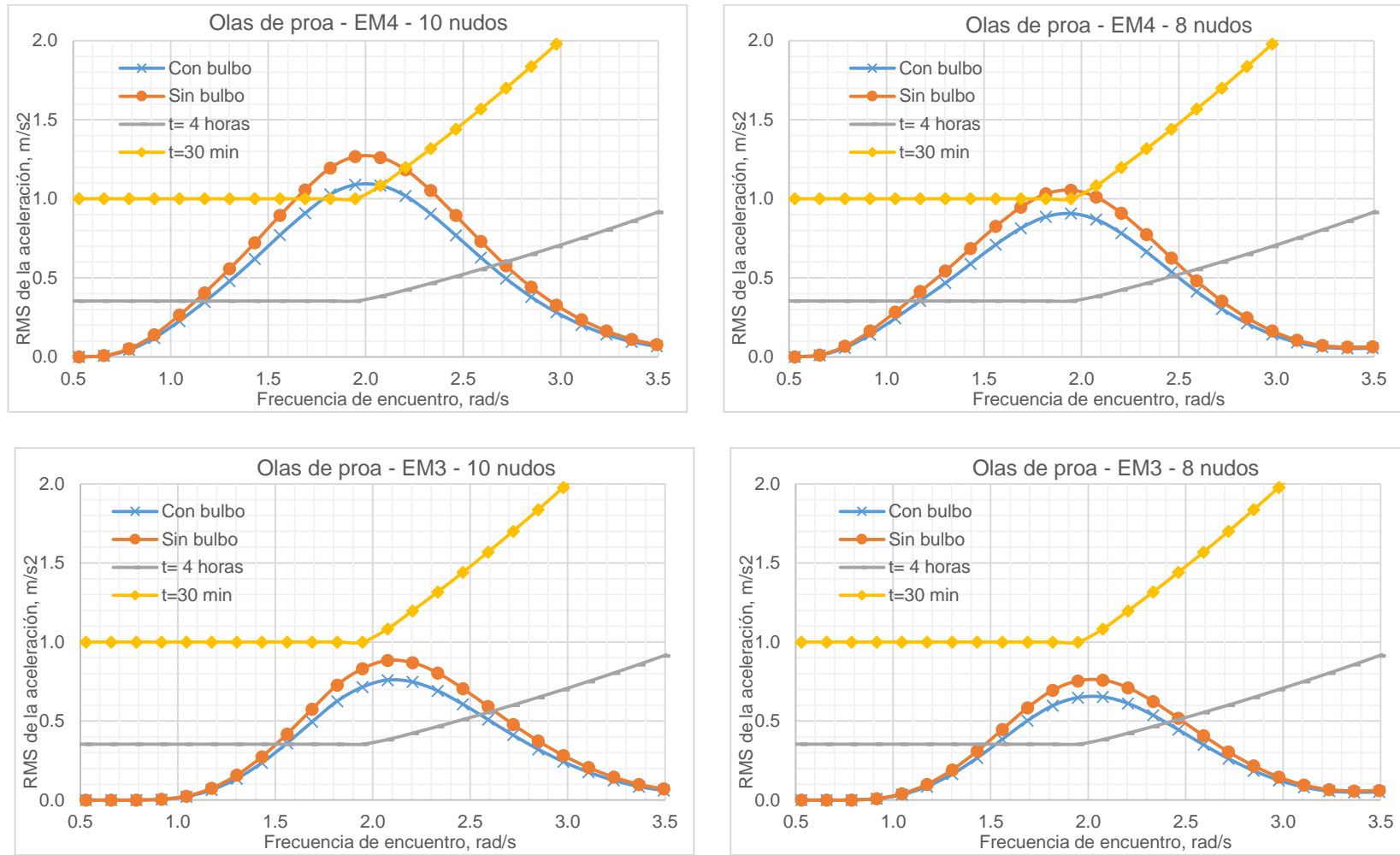


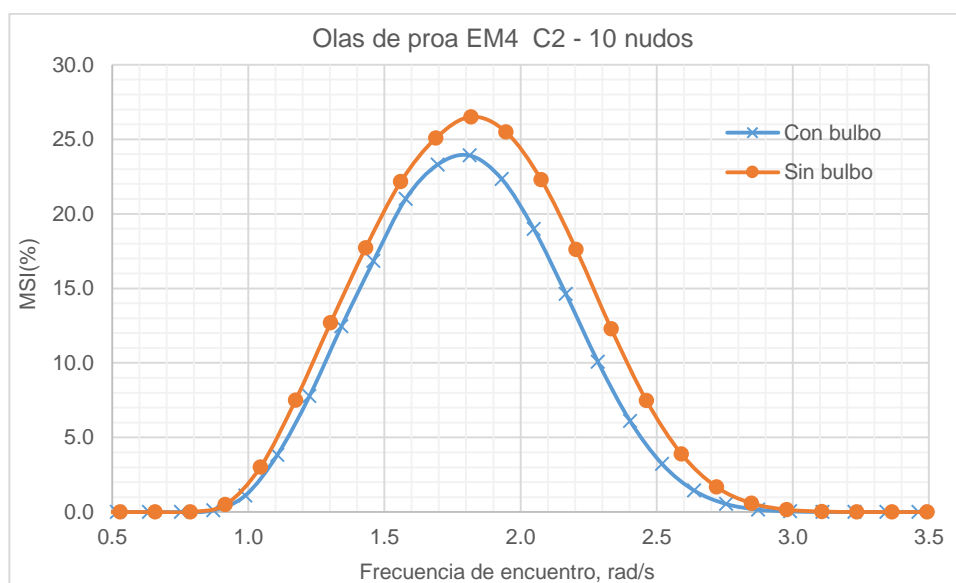
Figura 4.5: Valor RMS de la aceleración vertical para la condición de carga uno (Llegada a puerto) con olas de proa.

En la Figura 4.4 y 4.5 se puede verificar que para un estado de mar 3 no existe malestar por movimiento en un tiempo de exposición de 30 minutos a movimientos estacionarios, mientras que para 4 horas el malestar persiste. Se puede notar que en cada uno de los casos de análisis existe una ligera reducción en los valores RMS para el modelo con bulbo en comparación al modelo sin bulbo.

Evaluación del confort con los pasajeros por índice de malestar por movimiento

Considerando el espectro de la aceleración absoluta obtenido del software computacional para el modelo con bulbo y sin bulbo, e integrando el área bajo la curva en rangos de frecuencia de $1/3$ de la banda octava, se obtiene el valor RMS de la aceleración. Luego mediante la ecuación del profesor O'Hanlon Ecuación 22 (O'Hanlon & Michael, 1973) se obtiene el porcentaje de personas que se marean a bordo del buque luego estar expuestos dos horas a movimientos estacionarios.

A continuación, se muestran las curvas para evaluar los resultados del modelo con bulbo y sin bulbo para el punto 2 ubicado en sección media para dirección de ola de 180 grados en estados de mar 3 y 4.



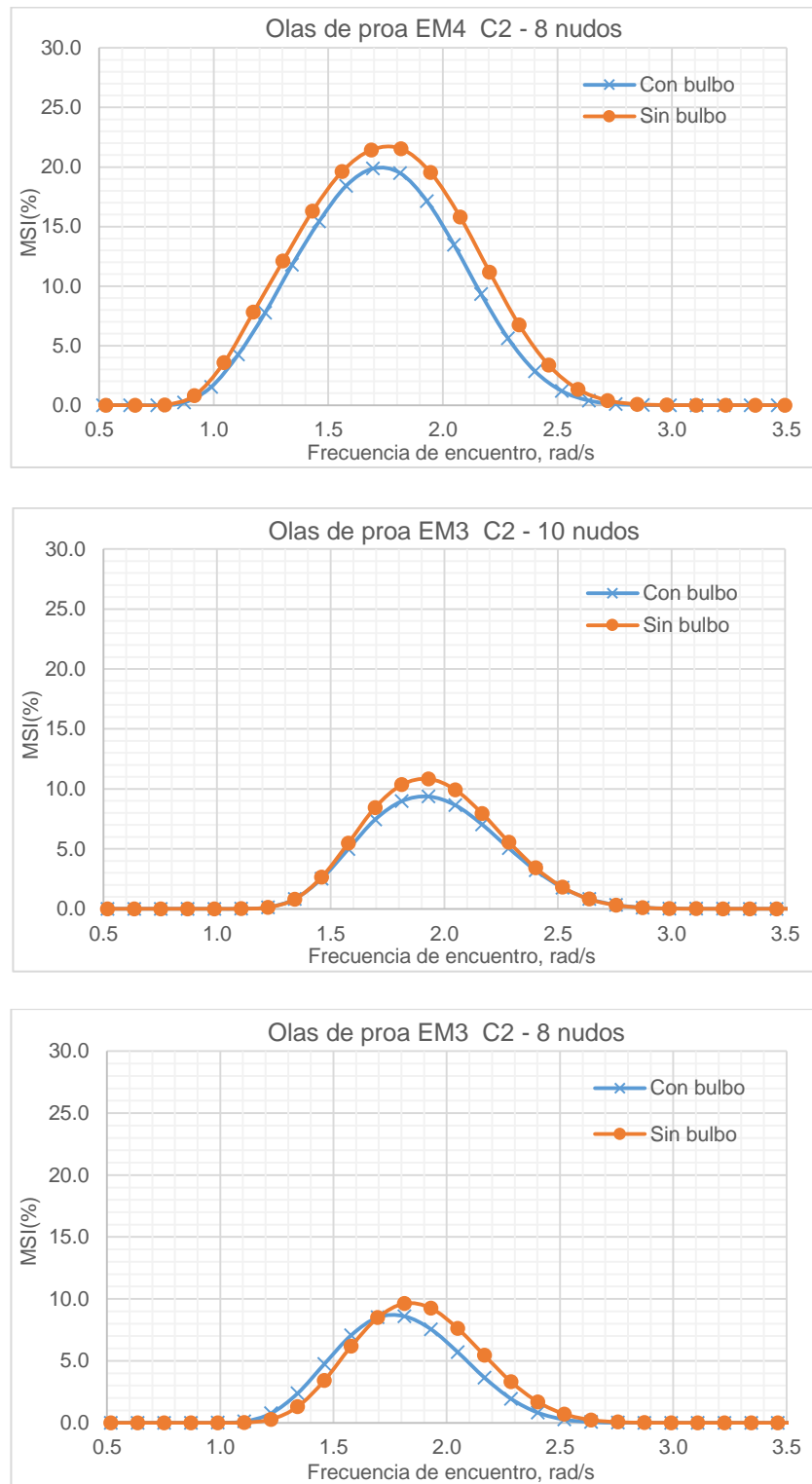


Figura 4.6: Porcentaje de personas que se marean a bordo para el modelo con y sin bulbo.

Como ya se mencionó en el capítulo 3, en buques de pasajeros se espera que el número de pasajeros que se marean a bordo sea menor al 10 o 20 % (Edward V. Lewis (SNAME), 1988). Considerando un valor promedio del 15% se tiene que para estado de mar 4 persiste el malestar por movimiento, mientras que para el estado de mar 3 estos valores son menores al 10%.

Discusión de resultados

Tomando en consideración los resultados obtenidos en la tabla 4.8, la frecuencia de impacto por hora disminuye considerablemente para el modelo con la adaptación del bulbo. El bulbo de proa genera su propio tren de olas, que en combinación con el sistema de olas del buque generan una ola secundaria la cual tiende a reducir el cabeceo en mares agitados teniendo mayor amortiguación en el plano vertical. La amortiguación en dicho plano mejora los movimientos verticales reduciendo la probabilidad de golpeteo (slamming) en la estructura de conexión.

Se nota en la Figuras 4.4 y 4.5 una ligera mejora en los valores obtenidos para evaluar el valor RMS de la aceleración vertical para el modelo con la adaptación del bulbo, sin embargo esta mejora no es suficiente para indicar que el malestar por movimiento desaparece. En el caso del factor MSI según la Figura 4.6 se nota que la incidencia del bulbo mejora parcialmente los resultados, sin embargo para el estado de mar 4 este porcentaje supera el 15% de pasajeros que se marean a bordo, superando el límite establecido para buque de pasajeros, mientras que para el estado de mar 3 estos porcentajes están por debajo del 10%.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado el confort de los pasajeros a bordo del catamarán Galaxy II de 28 m de diseño nacional, construido con poliéster reforzado con fibra de vidrio que opera en las Islas Galápagos; para ello se consideran las condiciones de carga reales del buque y estados de mar 3 y 4, típicos de la región. Los estados de mar considerados son los más altos reportados en cada mes, es decir, no necesariamente en un mes se va a encontrar con ese nivel de olas. Además, se analiza la influencia de adaptar un bulbo de proa sobre la respuesta de la embarcación y finalmente en el confort de los pasajeros. Luego de analizar y comparar los resultados, se puede concluir:

1. Se espera que para el estado de mar 4 para las condiciones de carga 1 ,y, 2 a una velocidad de 10 nudos y olas de proa, los pasajeros presenten elevado malestar por movimiento al navegar en las condiciones de operación propias de las Islas Galápagos. Este elevado malestar por movimiento se ve reflejado en el índice de malestar por movimiento el cual supera el 20% para un tiempo de exposición de dos horas a movimientos estacionarios.
2. El malestar por movimiento en los pasajeros se reduce considerablemente para el estado de mar 3 con olas de proa a una velocidad de 10 nudos para las condiciones de operación 1 y 2. La reducción de este malestar por movimiento se ve reflejado en el porcentaje de personas que se marean a bordo el cual se encuentra aproximadamente por debajo del 15% para un tiempo de exposición de dos horas a movimientos estacionarios.
3. La frecuencia de impacto en la estructura de conexión no genera daños estructurales para una velocidad crítica de 10.17 m/s. sin embargo, en la revisión bibliográfica no se ha encontrado valores límites que permitan evaluar la comodidad de los pasajeros en función de la frecuencia de impacto.

4. La adición del bulbo de proa reduce sustancialmente la frecuencia de impacto en la estructura de conexión de los semicascos, y, reduce parcialmente el índice de malestar por movimiento de los pasajeros para las mismas condiciones de carga y estados de mar. Considerando que la adición del bulbo de proa reduce el cabeceo en mares agitados mejorando los movimientos en el plano vertical

RECOMENDACIONES

1. Evaluar el confort de los pasajeros a bordo del catamarán Galaxy II, considerando la influencia de otro tipo de apéndices tales como aletas estabilizadoras, quillas de balance, entre otras. De esta manera se podrá evaluar si existe alguna forma de reducir el porcentaje de personas que se marean a bordo bajo las condiciones de navegación propias de las Islas Galápagos.
2. Establecer criterios que nos permitan evaluar el confort en función de la frecuencia de impacto en la estructura de conexión entre los semicascos. Considerando que no existe una expresión que nos permita evaluar la velocidad crítica y el número de veces máximos permitidos que la ola puede golpear la estructura de conexión sin que los pasajeros presenten incomodidad a bordo.

BIBLIOGRAFIA

- Maxsurf Motion . (2013). *Maxsurf Motions User Manual*.
- American Bureau of Shipping. (2018). *Ship Vibration*. New York.
- Bhattacharyya, R. (1978). *Dynamics of Marine Vehicles*. Canada: Wiley Interscience.
- Dubrovsky, V., & Lyakhovitsky, A. (2001). *Multi-Hull Ships*. United States of America: Backbone Publishing Company.
- Edward V. Lewis (SNAME). (1988). *Motion in Waves, Principles of Naval Architecture Volume III*. New Jersey.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Trondheim, Norway: John Wiley & Sons, Ltd.
- Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador. (2015). *Atlas Marino Costero del Ecuador*. Guayaquil: Ministerio de la Defensa Nacional.
- International Organization for Standardization 2631 - 1. (2004). *Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole - body vibration - Part 1*. Switzerland.
- J, W., P, T., & A, M. (1999). *Experimental Measurements of the Seakeeping Characteristics of Fast Displacement Catamarans in Oblique Waves*.
- José R. Marín, P. (2005). Estimación probabilística del francobordo de una embarcación menor oceánica. *XIX Congreso Panamericano de Ingeniería Naval*, 11.
- Karppinen, T., & Aitta, T. (1986). *Seakeeping Performance Assessment of ship*. Finlandia.
- Morante, R. (2015). *Reporte de estabilidad catamaran crucero 28 m "Galaxy II"*. Guayaquil.
- North Atlantic Treaty Organization (NATO). (2000). *Standardization Agreement (STANG)*.
- O'Hanlon, J., & Michael, M. C. (1973). *Motion Sickness Incidence as a Function of the Frequency and Acceleration of Vertical Sinusoidal Motion*. Springfield: National Technical Information Service.
- Omer, H. (2016). *The impact of wave slamming induced vibration on human factor and equipment on board the S.A Agulhas II*.
- Piscopo, V., & Scamardella, A. (2014). The overall motion sickness incidence applied to catamarans. *Interenational Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15.
- Prasanta, S., & J, L. (2009). *Theoretical and Experimental Study of Motion Characteristics High - Speed Catamaran Hull Forms*. Sydney, Australia.

Rojas Álvarez, C. (2017). *Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad*. Colombia: Universidad del Norte.

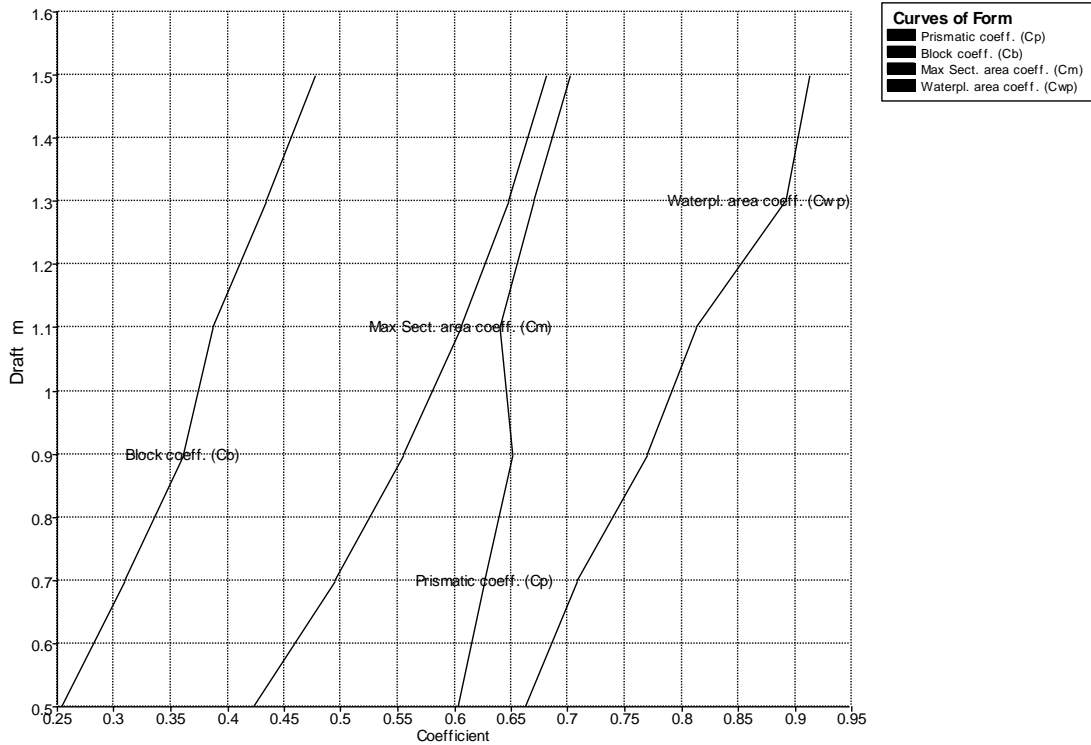
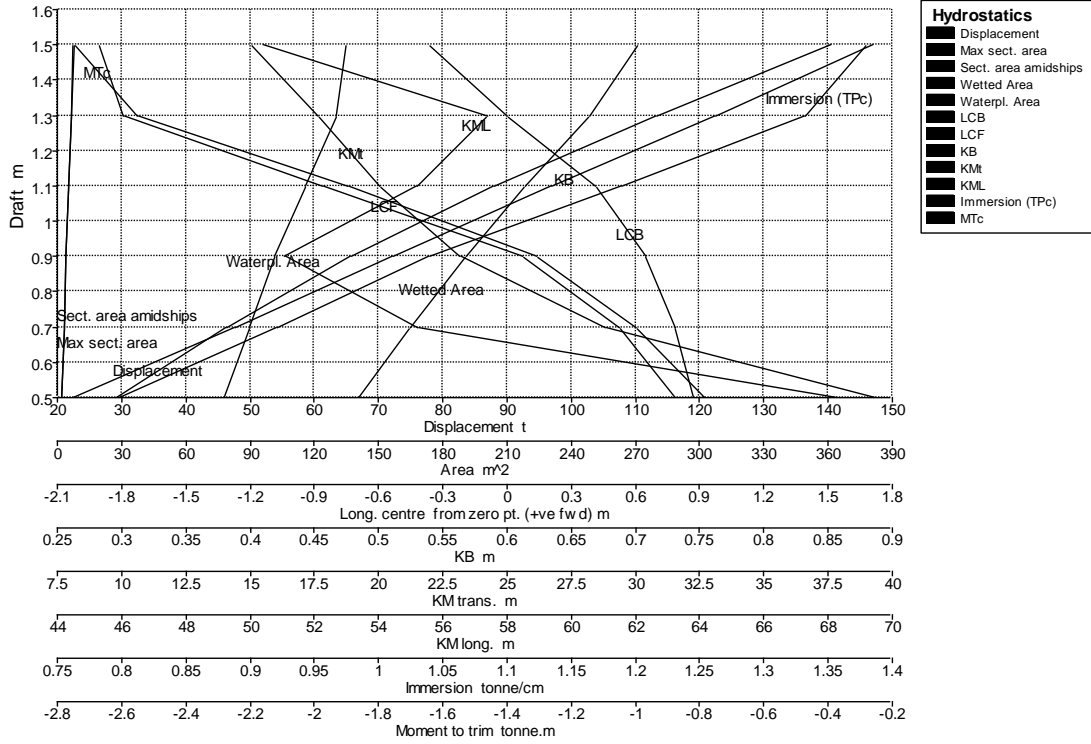
TristanPerez. (2005). *Ship Motion Control (Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudders and Fins)*, . Alemania: Springer - Verlag .

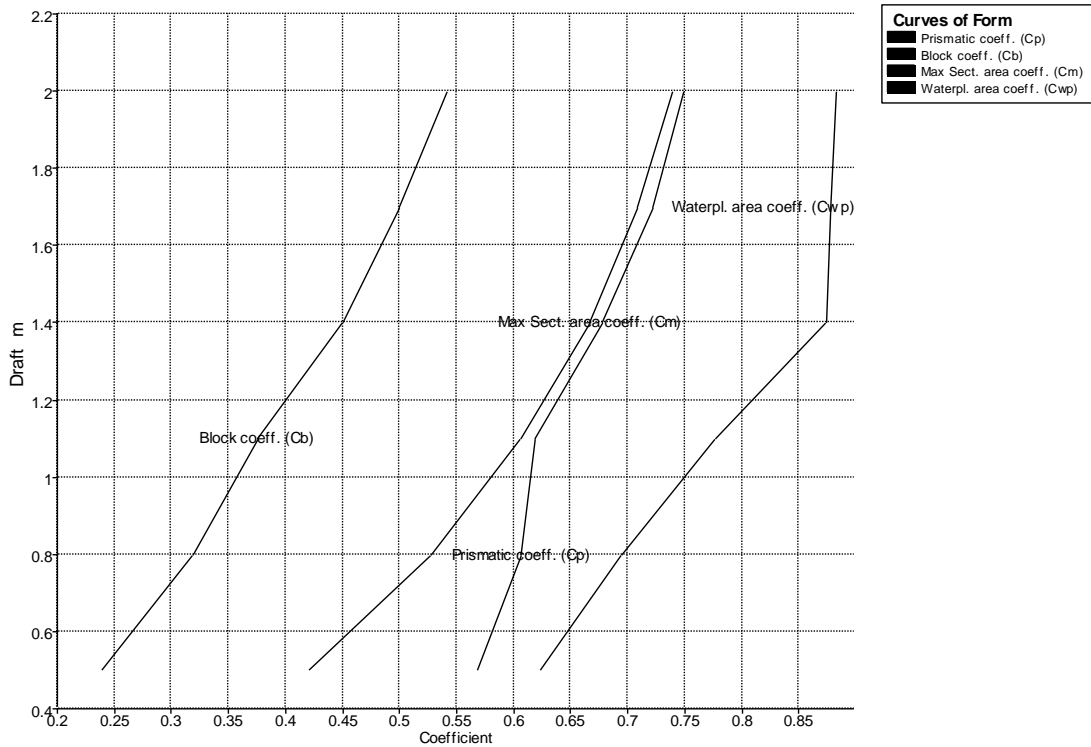
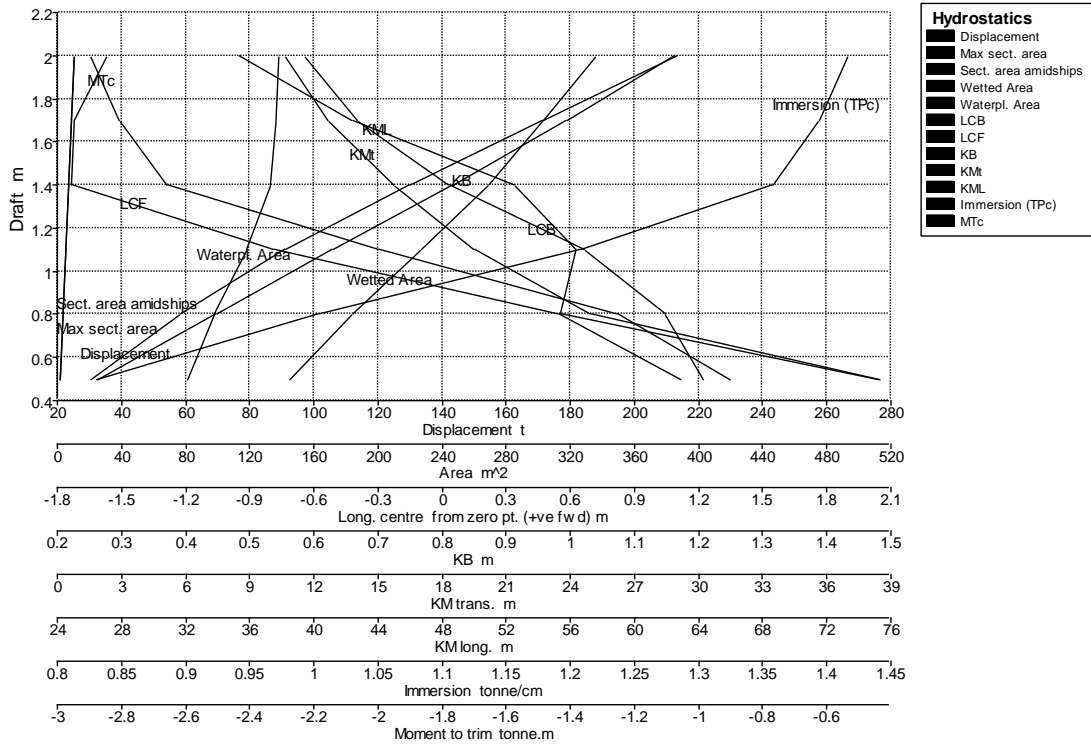
Vincenzo Piscopo, A. S. (Decemeber, 2015). *The overall motion sickness incidence applied to catamarans*. Houston.

Volker, B. (2000). *Practical Ship Hydrodynamics*. UK: British Library.

Zurita Herrera, G. (2008). *Probabilidad y Estadística Fundamentos y Aplicaciones*. Guayaquil: ESPOL.

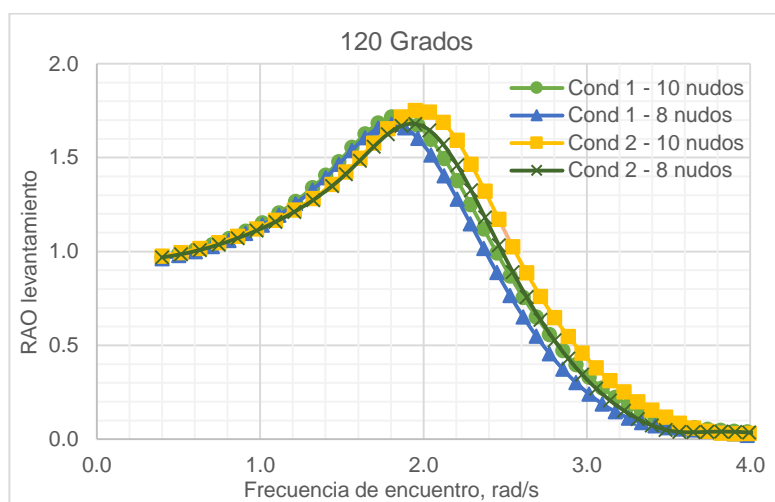
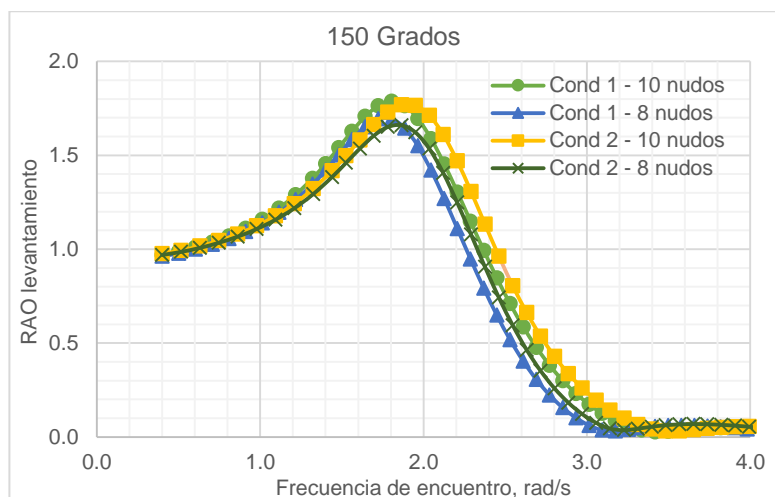
ANEXOS

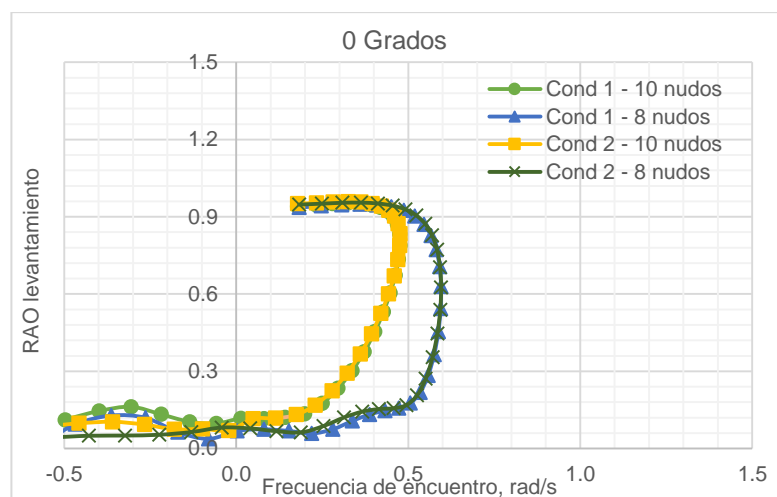
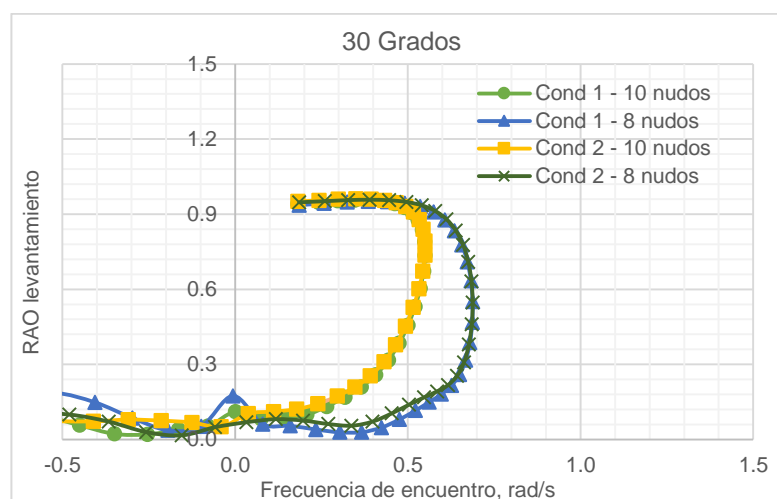
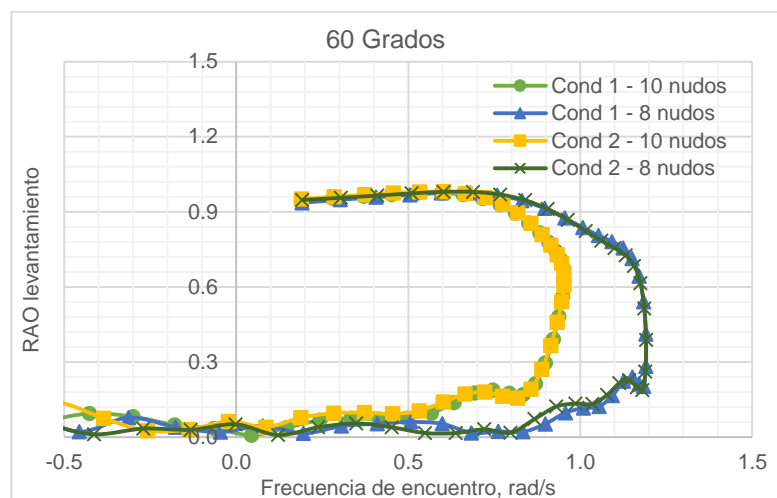


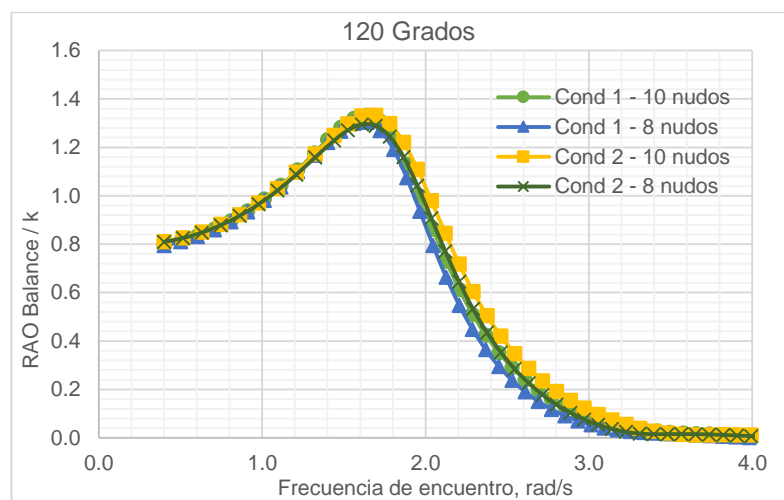
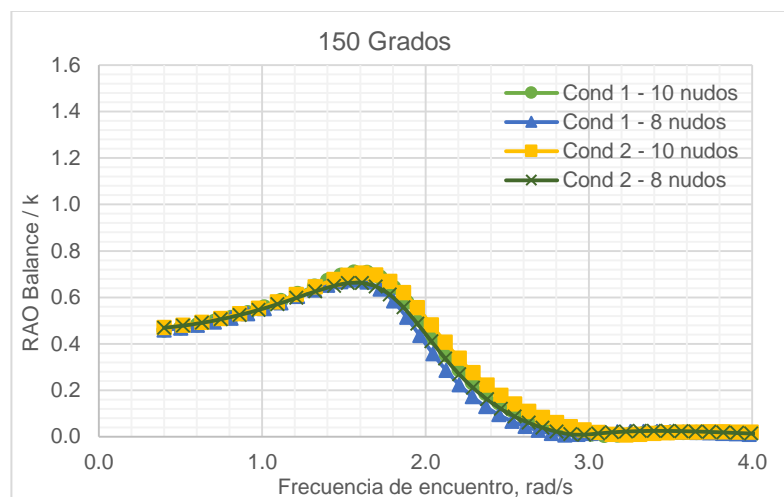


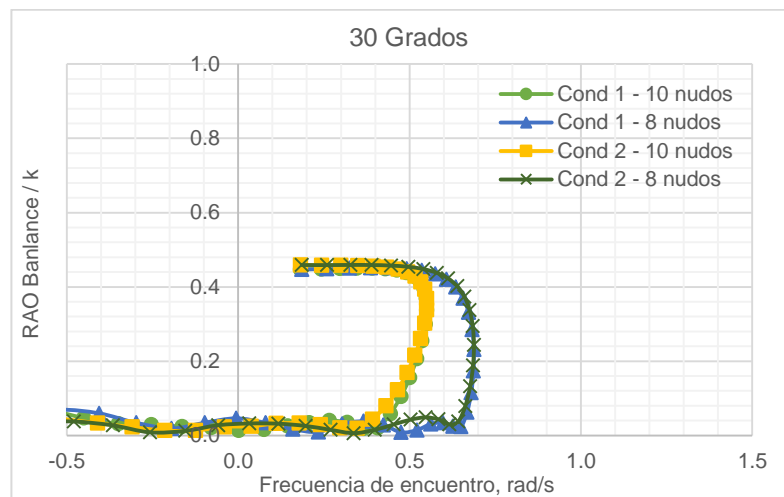
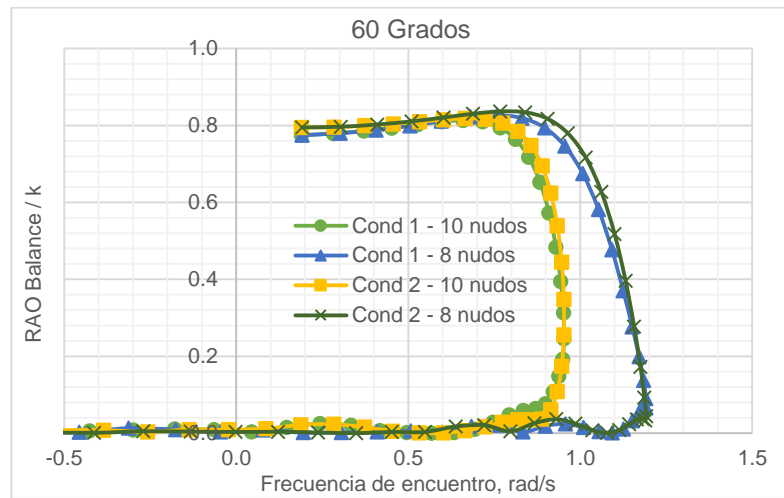
Anexo 2

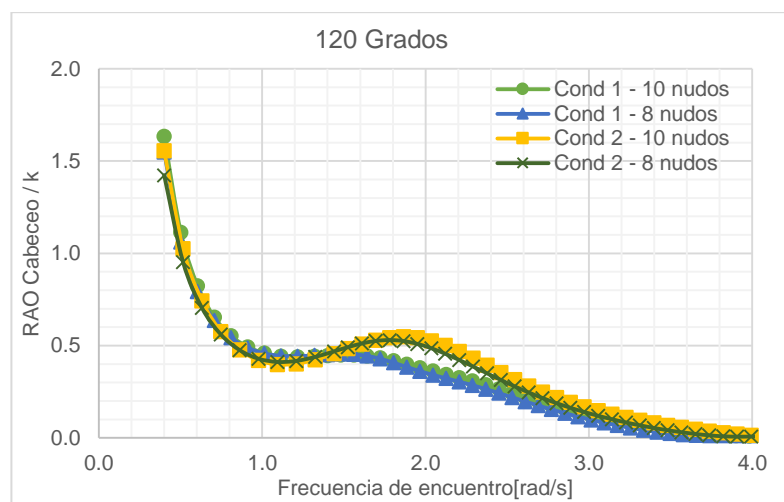
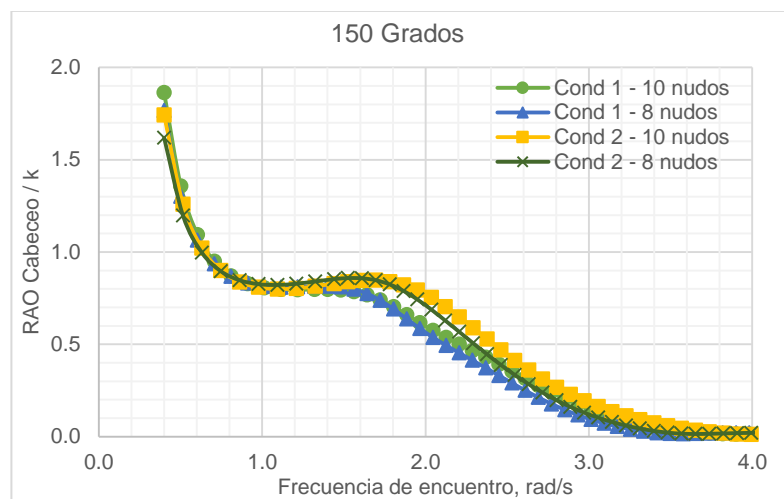
RAO's de levantamiento ($\beta=150^\circ; 120^\circ; 60^\circ; 30^\circ; 0^\circ$)

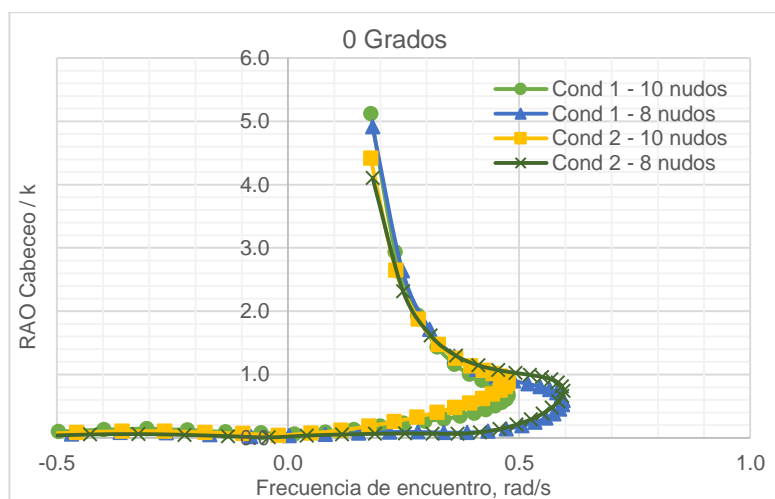
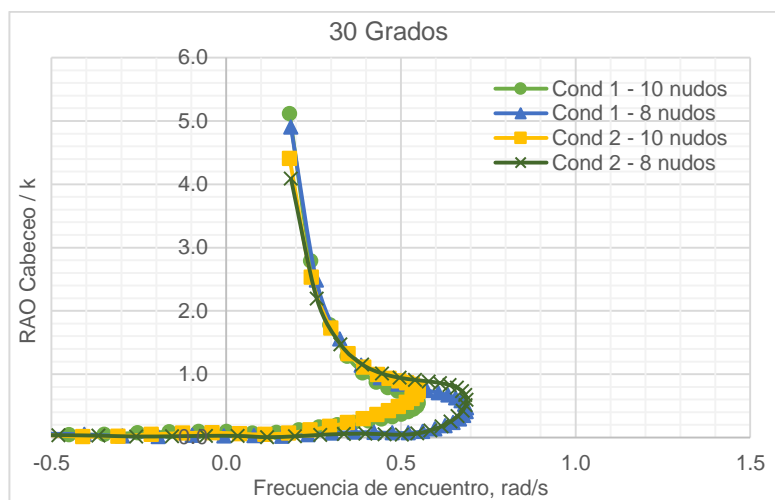
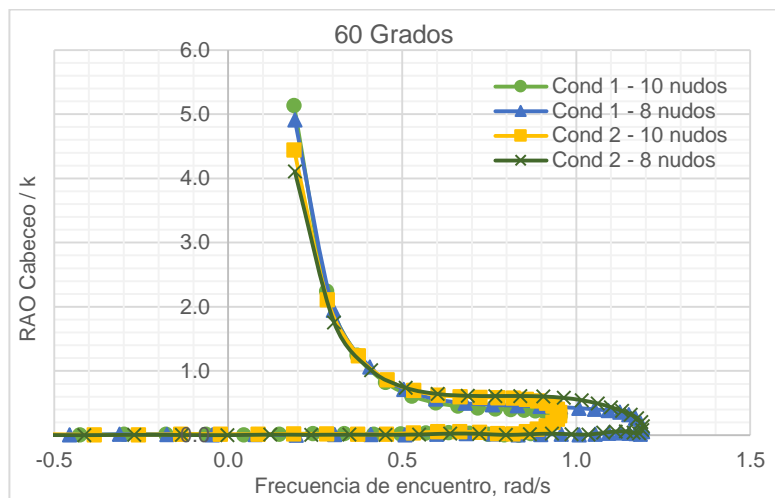




RAO's de balance ($\beta=150^\circ; 120^\circ; 60^\circ; 30^\circ; 0^\circ$)



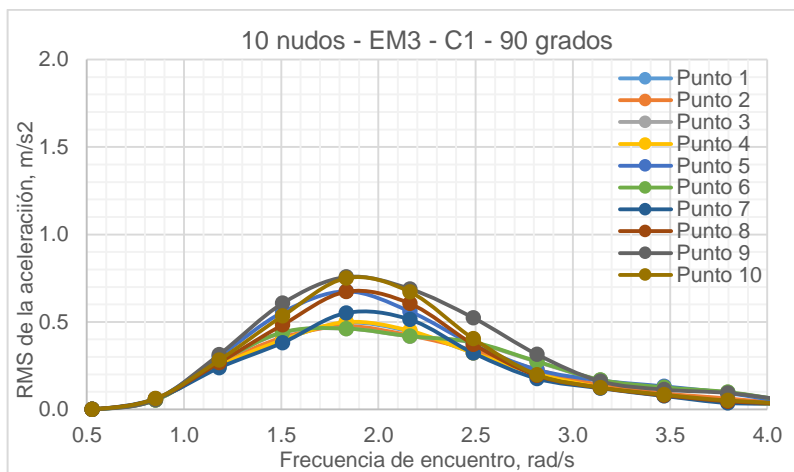
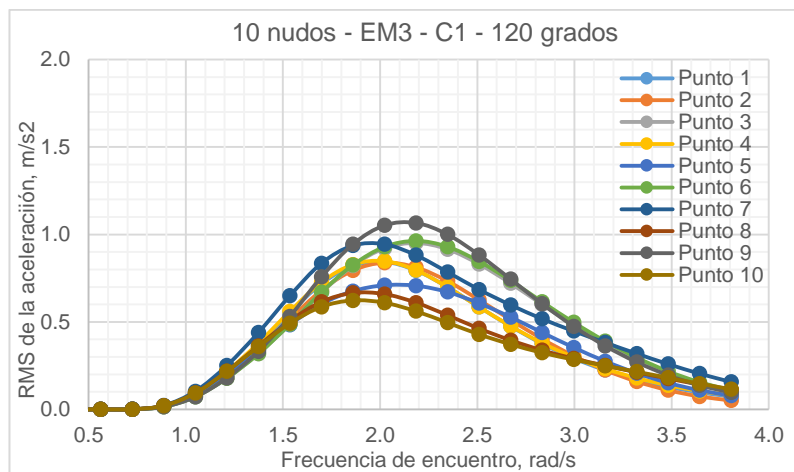
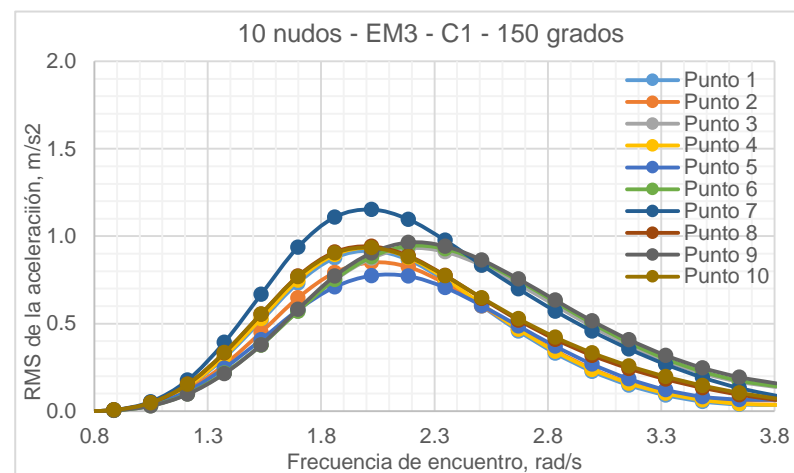
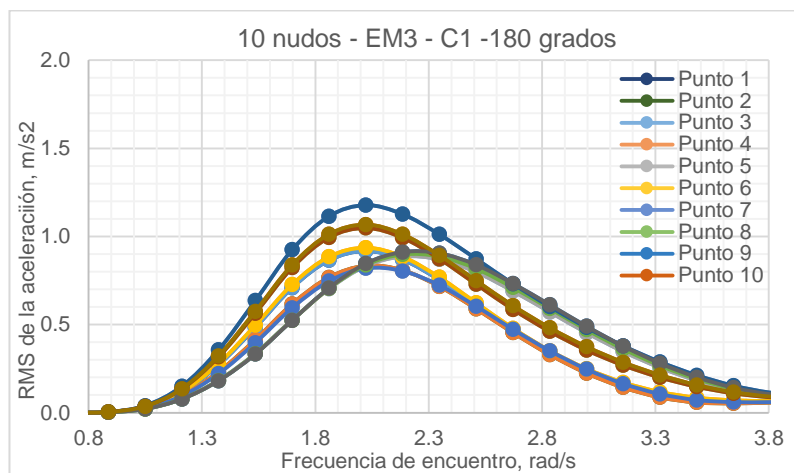
RAO's de cabeceo ($\beta=150^\circ; 120^\circ; 60^\circ; 30^\circ; 0^\circ$)

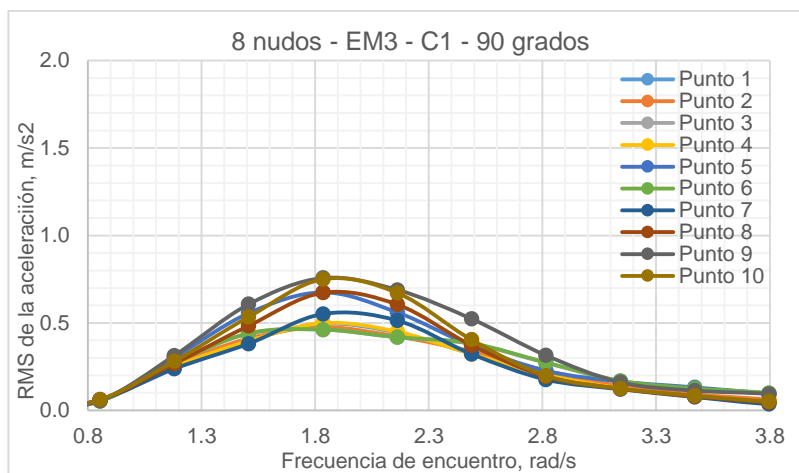
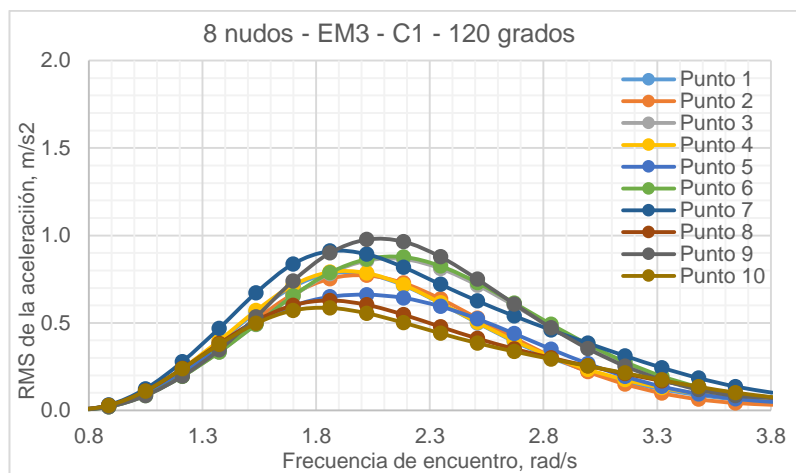
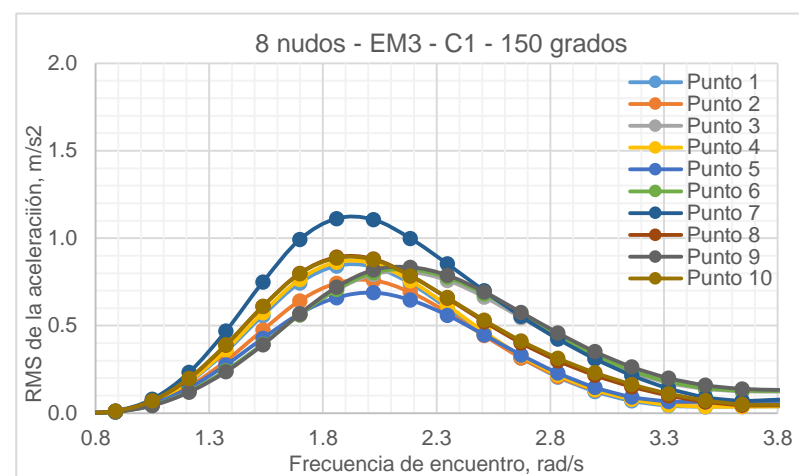
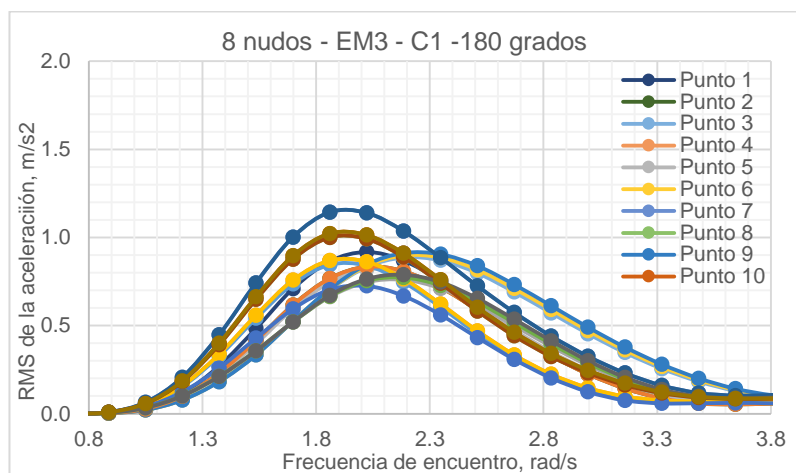


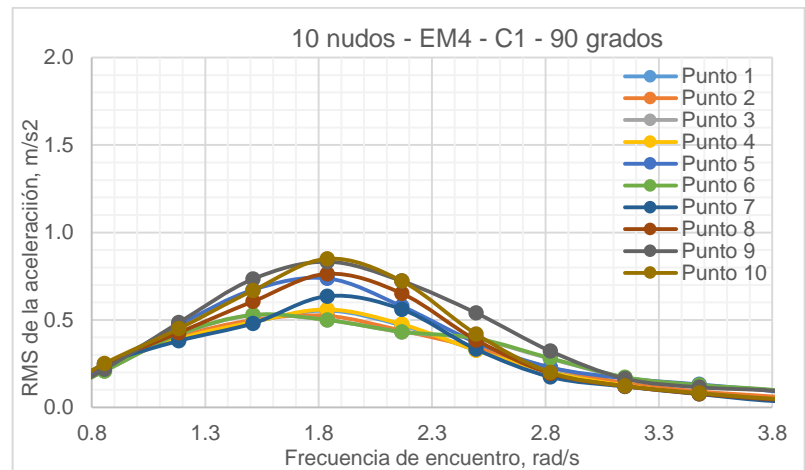
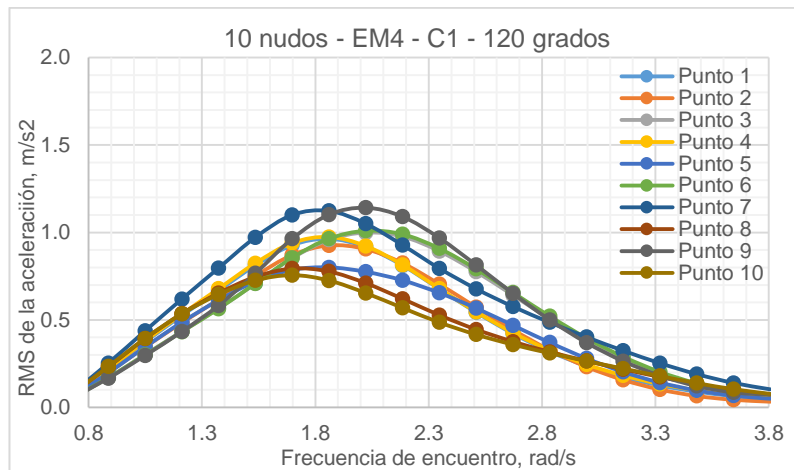
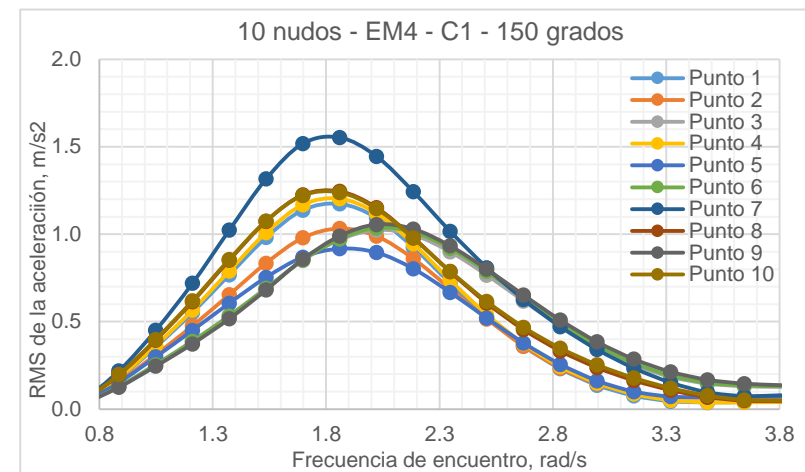
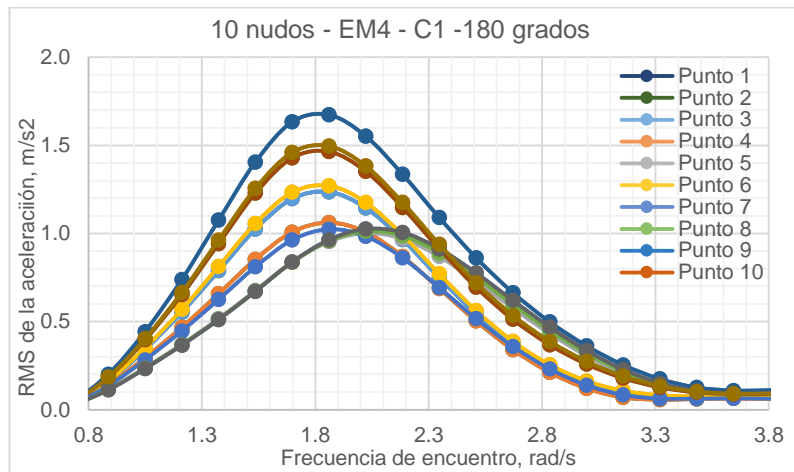
Anexo 3

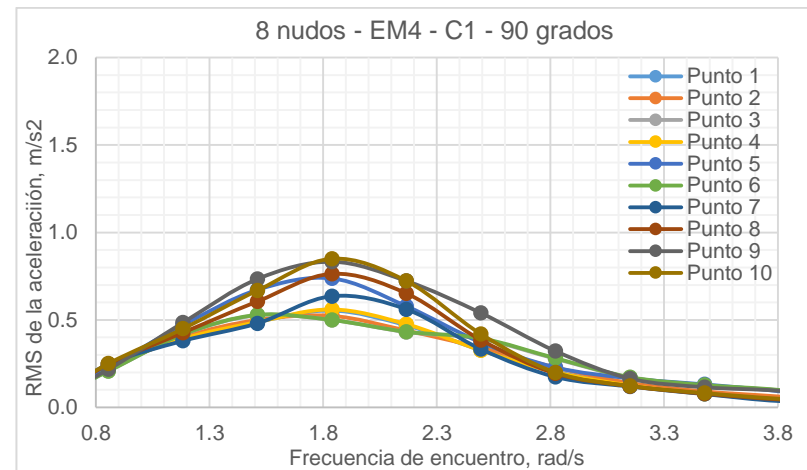
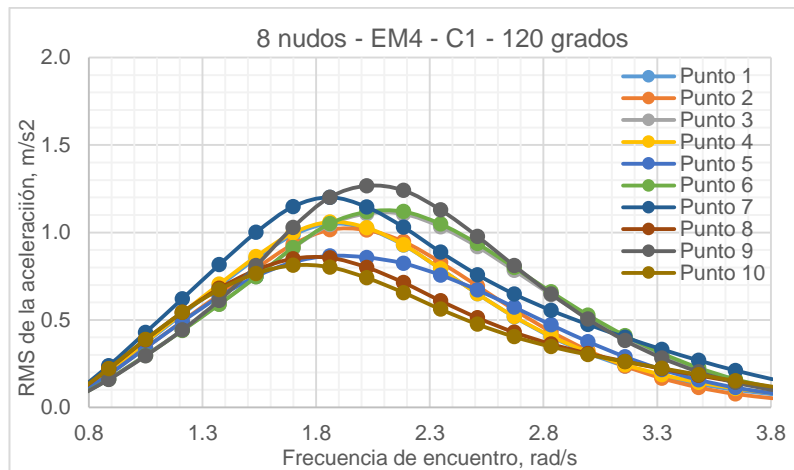
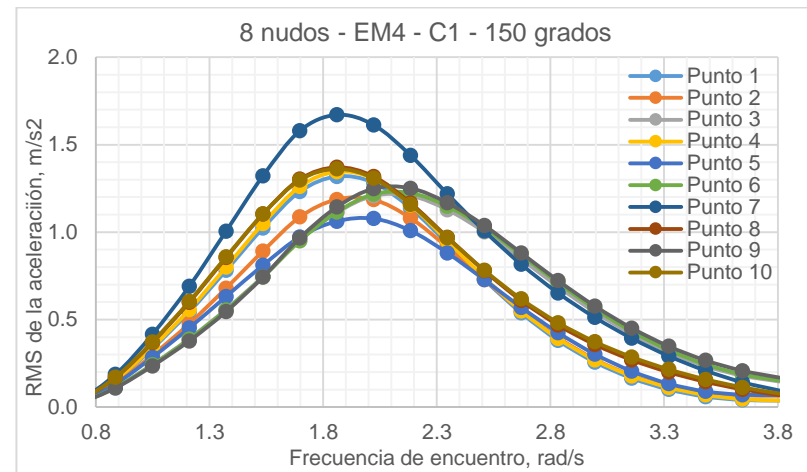
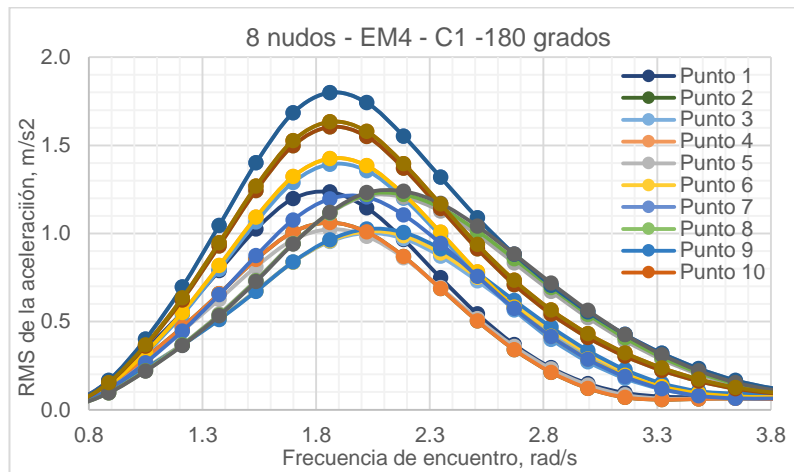
Valor RMS de la aceleración

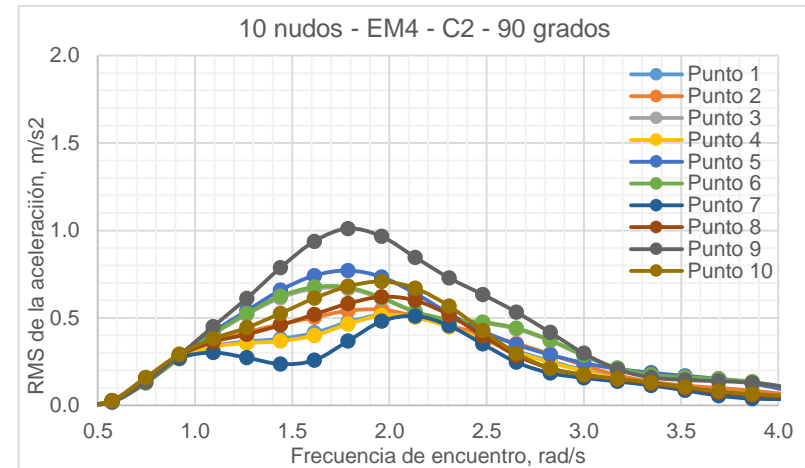
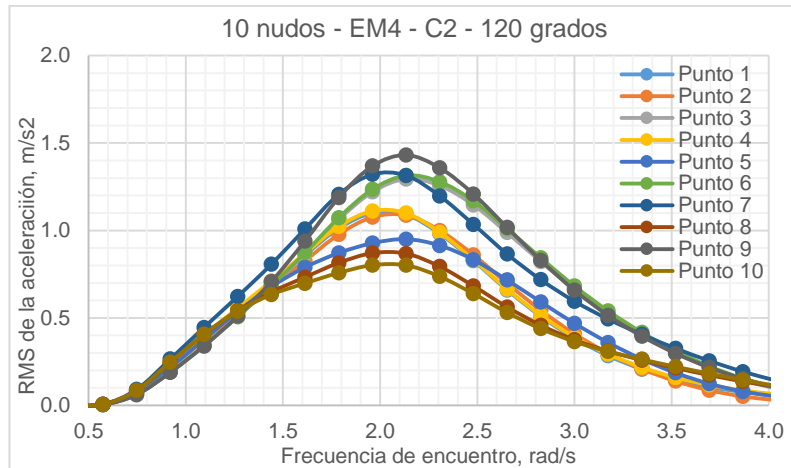
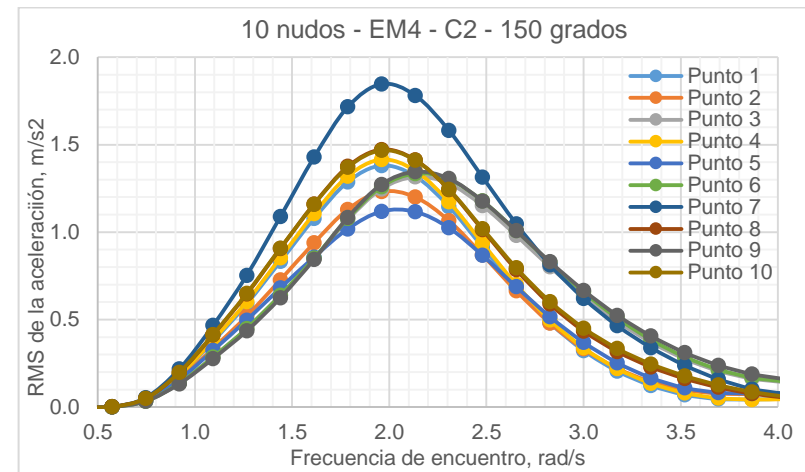
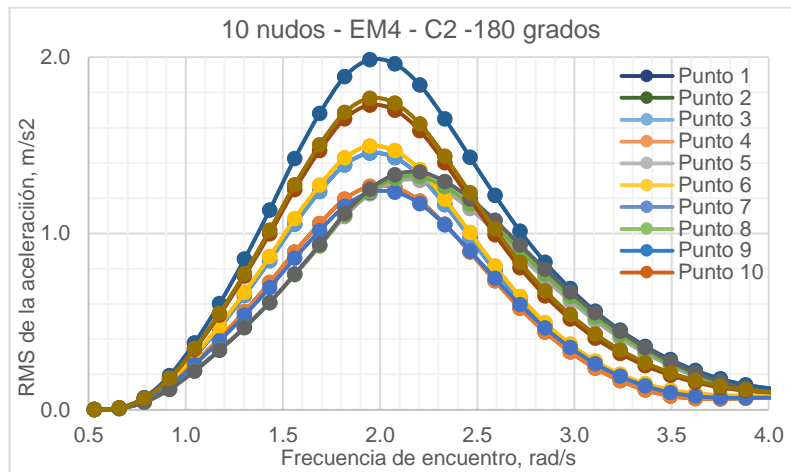
A continuación, se detallan los valores RMS de la aceleración para los estados de mar 3 y 4, rango de velocidades 10 y 8 nudos, para direcciones de olas desde 180 hasta 90 grados.

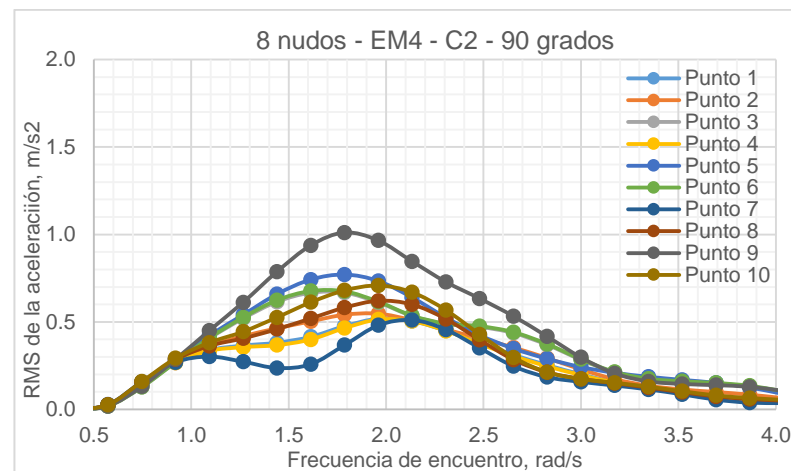
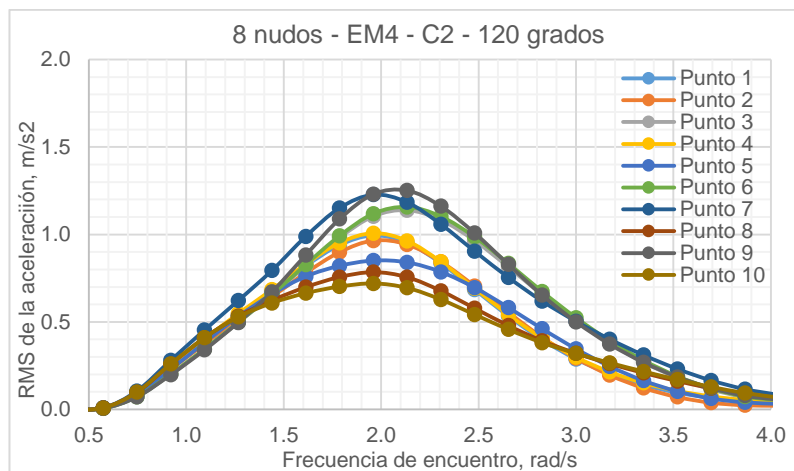
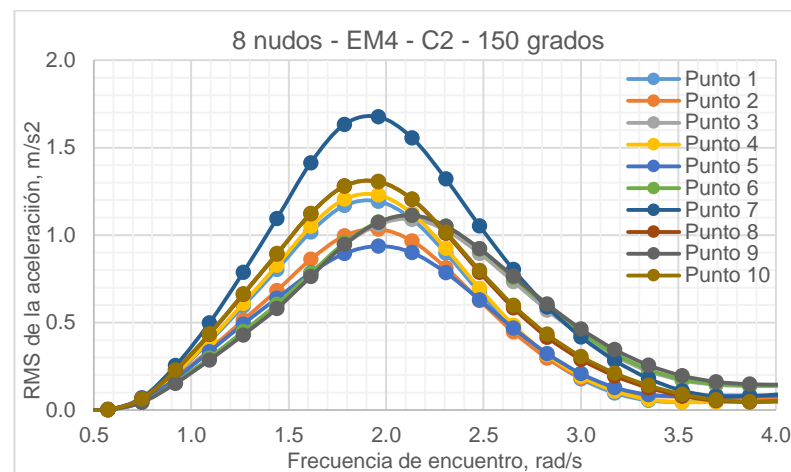
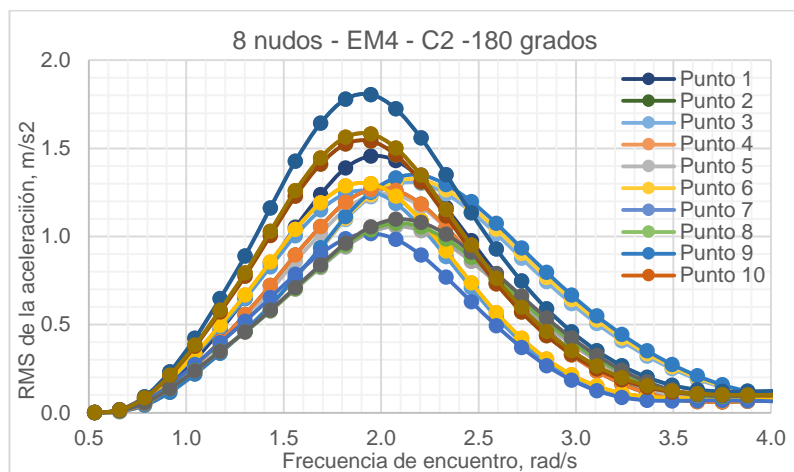


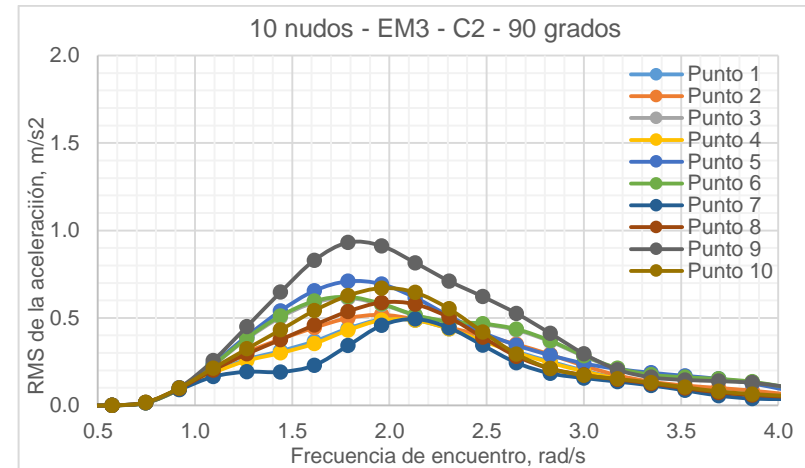
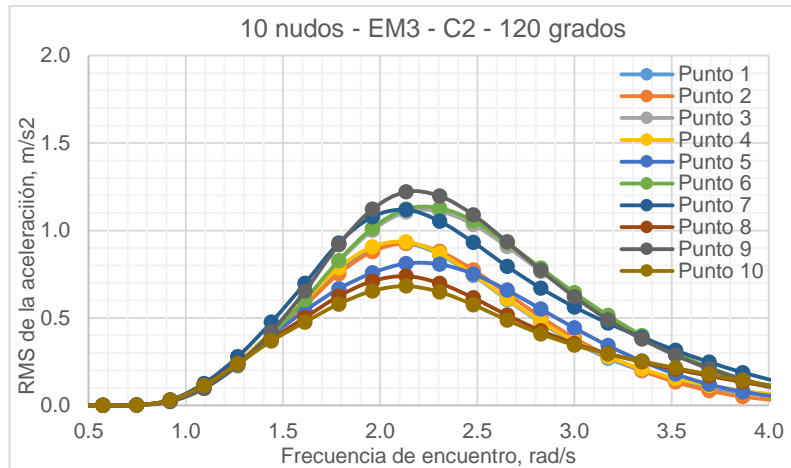
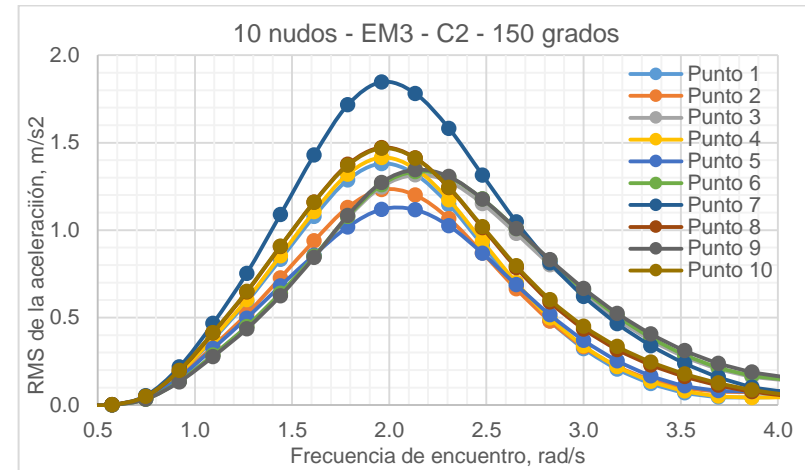
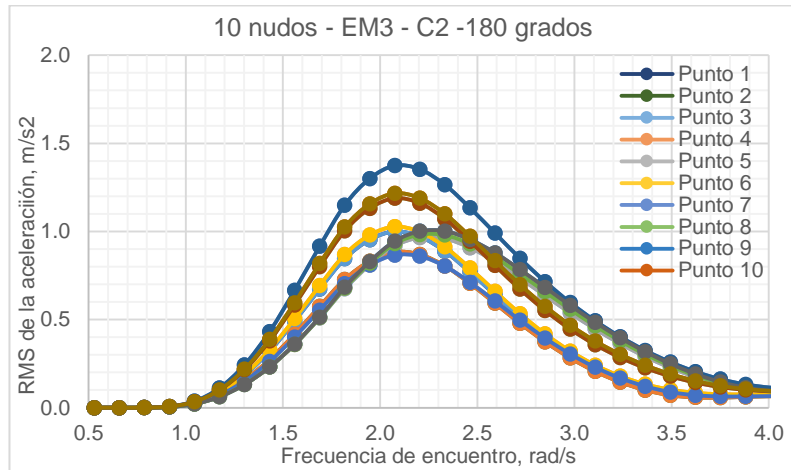


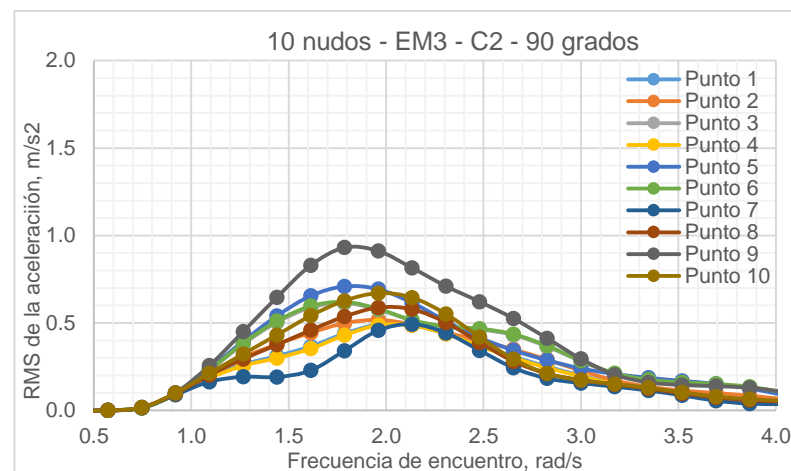
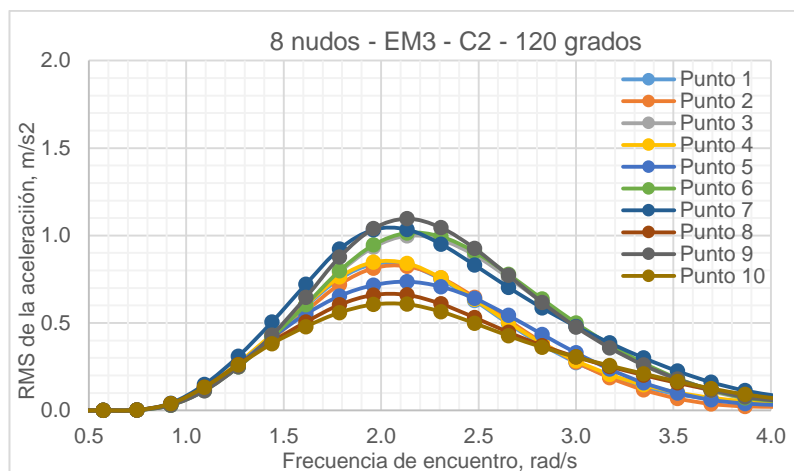
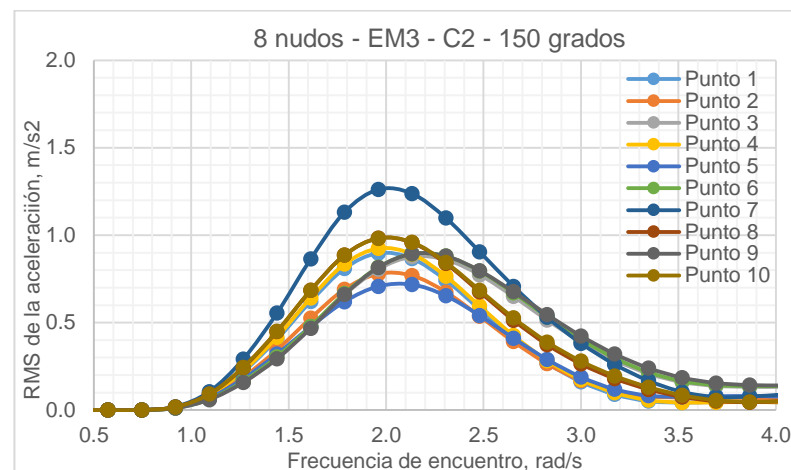
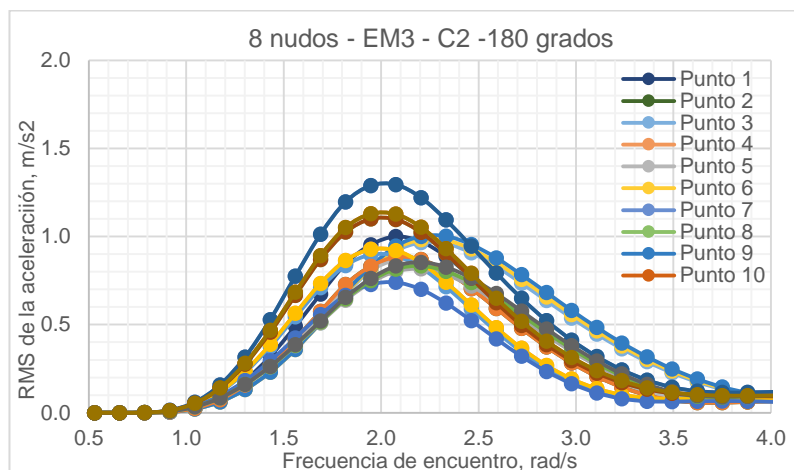












Anexo 4

Guía del uso de Maxsurf Motion

Maxsurf Motion es una herramienta computacional que permite calcular la respuesta del buque para diferentes condiciones de análisis. Para proceder al análisis se debe seguir ciertos pasos detallados a continuación:

1. Formas 3D del modelo
2. Importar el modelo 3D a Maxsurf Modeler
3. Maxsurf Motion, parámetros de análisis
4. Obtención de resultados

Cada uno de estos pasos se detallan a continuación:

1. Formas 3D del modelo

Mediante los pasos indicados en el capítulo 1, se obtienen las formas 3D del buque. Considerando que en este proyecto se analiza un catamarán, se debe ubicar el semicasco hacia al lado izquierdo del eje de referencia, de tal manera que al aplicar el comando simetría, el eje de referencia quede en la mitad de los dos semicascos.

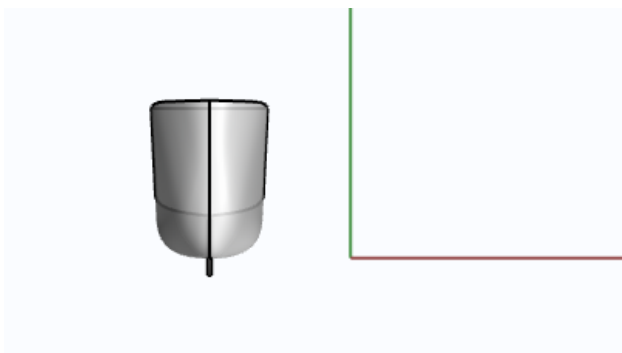


Figura 0.1: Posición del semicasco del catamarán.

Luego de esto se debe guardar el modelo en algún formato que el software Maxsurf pueda leer, siguiendo una serie de procesos detallados a continuación:

- Seleccionar el modelo y exportar la selección

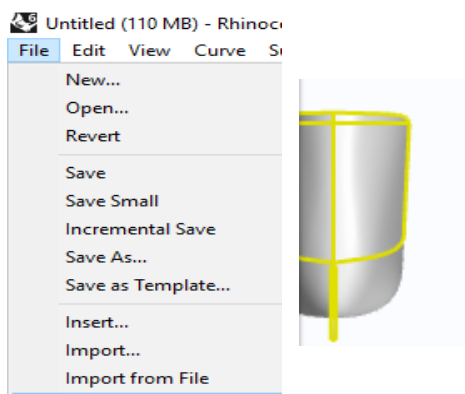


Figura 0.2: Exportar el modelo en formato IGES.

- Guardar en formato IGES

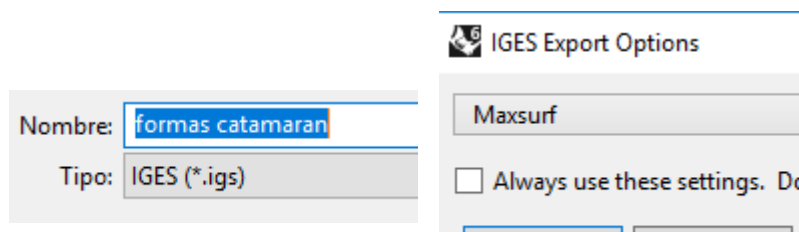


Figura 0.3: Guardar formas del catamarán en formato IGES extensión Maxsurf.

2. Maxsurf Modeler

Maxsurf Modeler extrae datos claves de diseño tales como las dimensiones principales de la superficie generada en Rhinoceros. Considerando que se importa únicamente un semicasco, en este módulo de Maxsurf se aplica el comando simetría y se definen algunos parámetros de diseño del catamarán. A continuación, se describen los pasos a seguir para finalmente analizar el modelo en Maxsurf Motion:

- Importar el modelo desde Maxsurf un archivo con formato Rhino

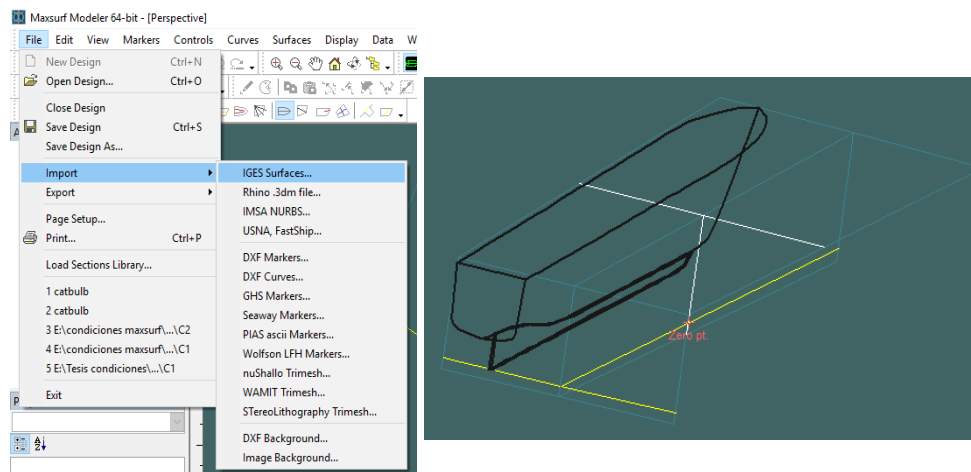


Figura 0.4: Importar el modelo desde Maxsurf con formato Rhino

- Realizar simetría del semicasco

El software Rhinoceros genera las formas del casco en algunas superficies. Seleccionando el comando *Symmetrical* se aplica simetría a cada una de las superficies importadas desde Rhinoceros, obteniendo los dos semicascos del catamarán.

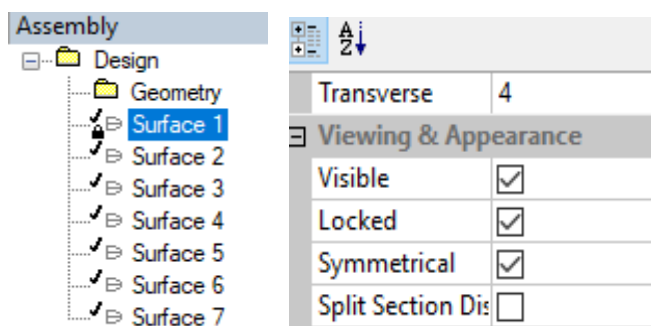


Figura 0.5: Aplicar simetría al modelo.

- Seleccionar parámetros de diseño

Se define el calado de la condición de análisis, la perpendicular de proa y de popa

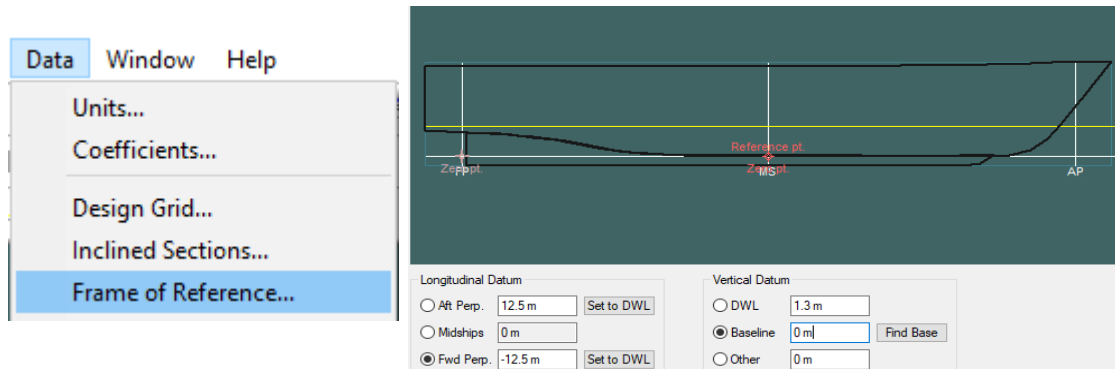


Figura 0.6: Parámetros de diseño.

- Espaciamiento entre semicascos

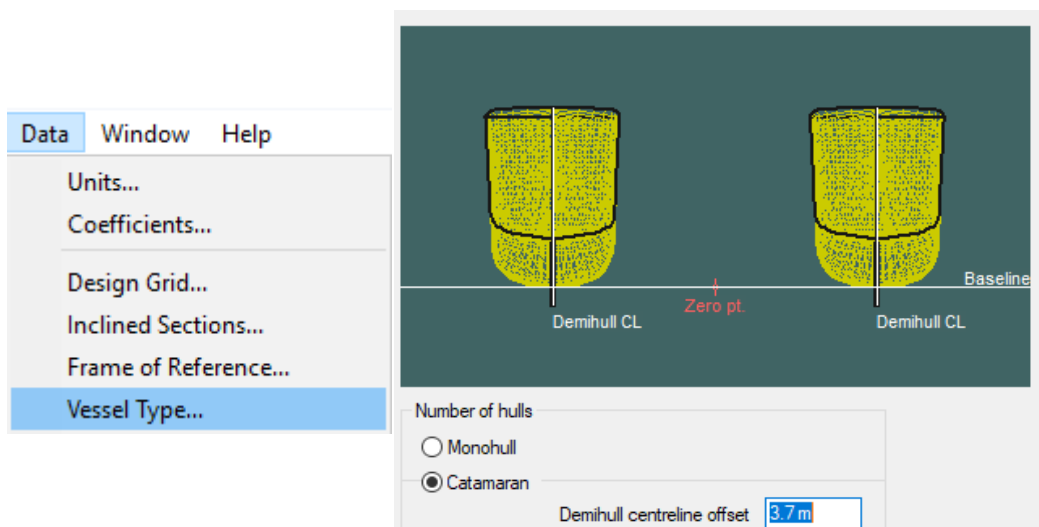


Figura 0.7: Espaciamiento entre semicascos.

- Guardar el modelo

Finalmente, se guarda el modelo en formato *msd*.

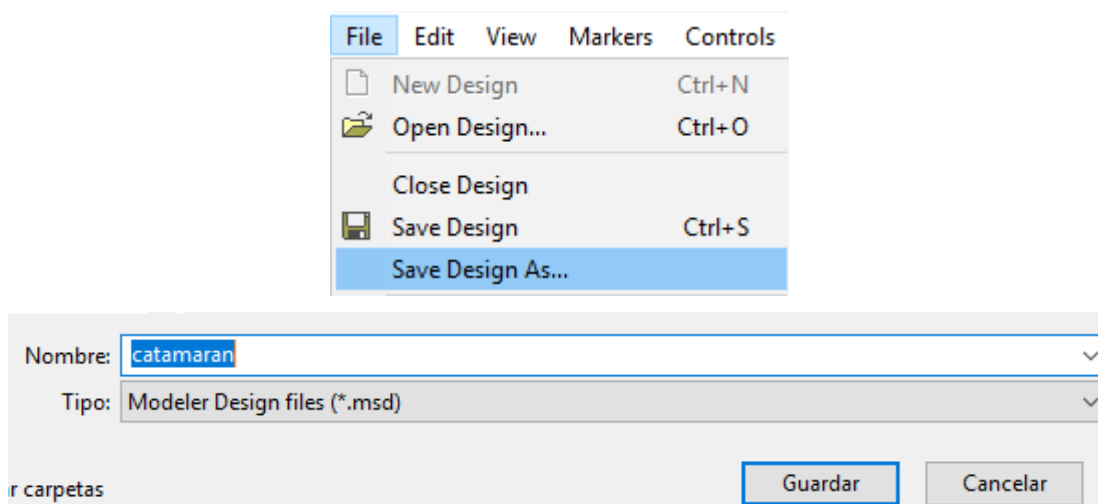


Figura 0.8: Guardar el modelo en formato msd.

3. Maxsurf Motion, parámetros de análisis

Para calcular la respuesta del buque para diferentes condiciones de análisis, es necesario seguir algunos pasos detallados a continuación:

- Apertura del modelo en Maxsurf Motions

Se escoge la opción *open design*, y se selecciona el modelo que se guardó en la sección anterior en formato *msd*.

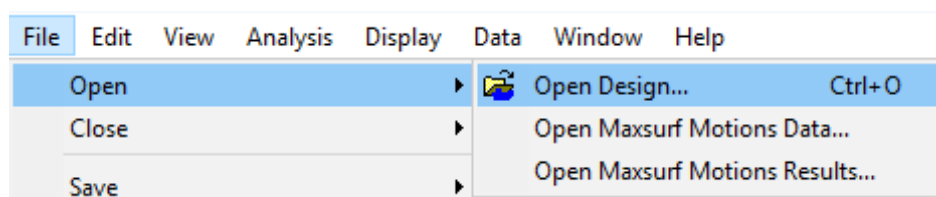


Figura 0.9: Abrir el modelo en formato msd.

- Método de análisis

Dependiendo del tipo de resultados que se desea obtener, el usuario debe definir el tipo de análisis que aplicara. En este proyecto se escogió la teoría de fajas (*Strip Theory*).

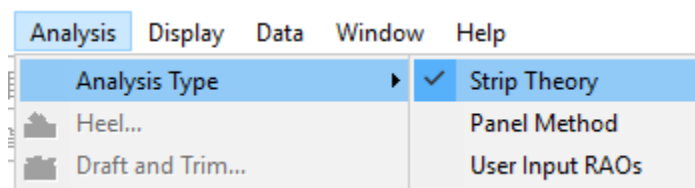


Figura 0.10: Selección del método de análisis.

- Calado del catamarán

Considerando que en Maxsurf Modeler se definió el calado del catamarán en la condición de análisis, en este módulo se verifica que el calado que se ingreso sea el correcto.

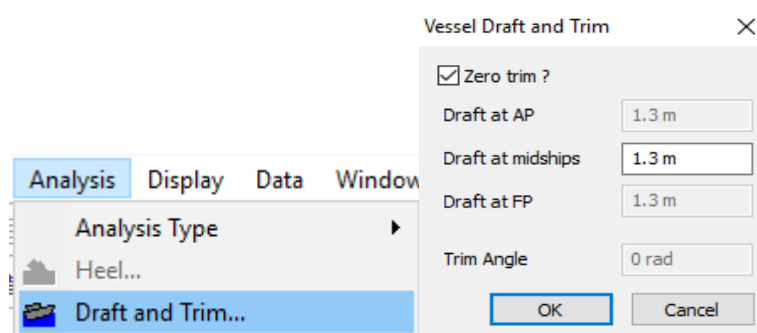


Figura 0.11: Ingreso del calado del catamarán para la condición de análisis.

- Medición del casco (Measure Hull)

Mide todas las superficies y se calcularán 41 secciones igualmente espaciadas. El número de secciones puede aumentarse, a fin de obtener mediciones más precisas.

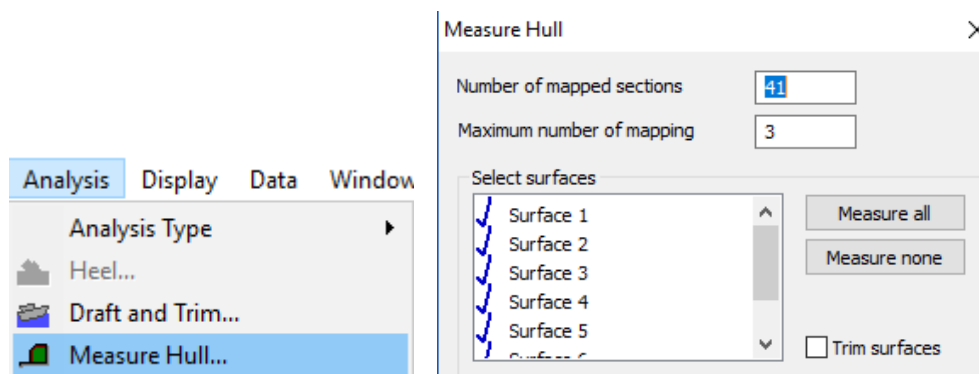


Figura 0.12: Measure Hull del catamarán

- Selección del tipo de buque

Considerando que en Maxsurf Modeler se definió el tipo de buque y el espaciamiento entre semicascos, en este módulo se verifica que los valores sean los correctos.

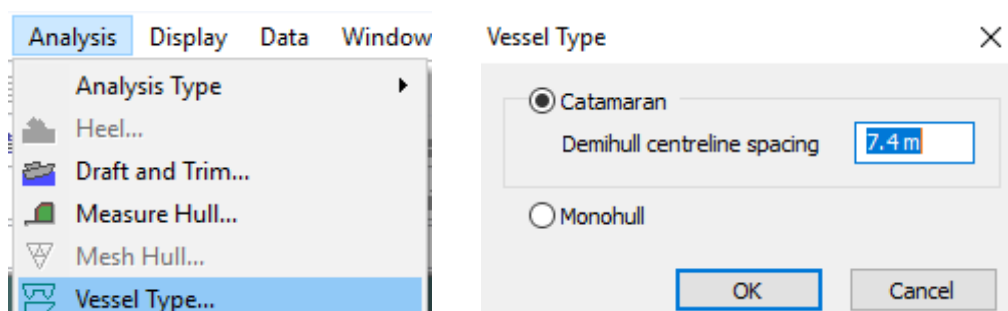


Figura 0.13: Selección del tipo de buque.

- **Mass Distribution**

Para el análisis de teoría de fajas se requiere conocer las inercias de balance y cabeceo. Estas inercias se obtienen mediante el radio de giro del catamarán los cuales están en función de la eslora y manga del buque. En esta sección también se ingresa el VCG del buque, el cual debe ser lo suficientemente bajo para que el GMT sea positivo.

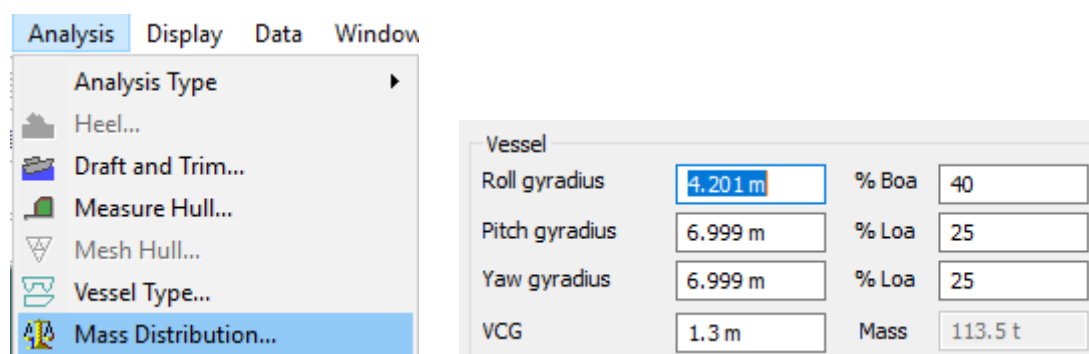


Figura 0.14: Distribución de masas del catamarán

- Coeficientes de amortiguamiento

Se agregan una amortiguación adicional a la respuesta de levantamiento y cabeceo, las cuales se aplican en el cálculo de las ecuaciones acopladas de movimiento. Para el caso de catamaranes no es necesario especificar el coeficiente de amortiguamiento para balance, ya que el programa los calcula internamente a partir de las propiedades de levantamiento.

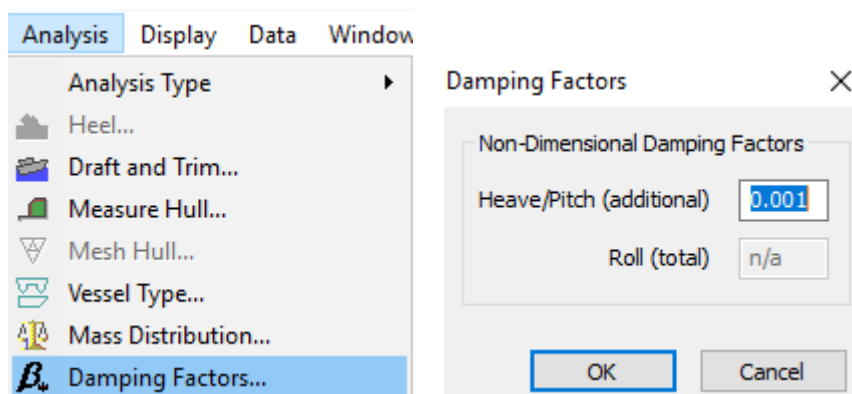



Figura 0.15: Coeficientes de amortiguamiento.

- Ubicación de las posiciones de análisis

Estas posiciones se conocen como ubicaciones remotas, y son útiles para determinar obtener la velocidad y aceleración relativas y absolutas en cada una de las posiciones indicadas. Se pueden ingresar el número de ubicaciones que el usuario desee y se las identifica por un nombre . Para agregar columnas utilice Ctrl + A y para eliminar elementos la tecla suprimir.

	Name	Long. Pos. [m]	Offset [m]	Height [m]	Long. Pos. fro	Offset from CG	Height from CG	MIJ slide frictio	MIJ tip fore/aft.	MIJ tip side/sid	Exposure time
1	P01	2.84	0.00	7.27	2.85	0.00	5.97	0.70	0.17	0.25	120
2	P02	-1.27	0.00	7.27	-1.26	0.00	5.97	0.70	0.17	0.25	120
3	P03	-8.73	0.00	7.27	-8.72	0.00	5.97	0.70	0.17	0.25	120
4	P04	3.54	0.00	5.28	3.55	0.00	3.98	0.70	0.17	0.25	120
5	P05	-2.45	-4.20	5.28	-2.44	-4.20	3.98	0.70	0.17	0.25	120
6	P06	-9.17	0.00	5.28	-9.16	0.00	3.98	0.70	0.17	0.25	120
7	P07	10.48	0.00	3.28	10.49	0.00	1.98	0.70	0.17	0.25	120
8	P08	7.06	-2.77	3.28	7.07	-2.77	1.98	0.70	0.17	0.25	120
9	P09	-9.67	2.95	3.28	-9.66	2.95	1.98	0.70	0.17	0.25	120
10	P10	7.60	-3.49	1.29	7.61	-3.49	-0.01	0.70	0.17	0.25	120

Figura 0.16: Posiciones de análisis.

En la primera columna se especifica el nombre del punto de análisis, en las tres siguientes se indica la ubicación de cada punto relativa al zero point del buque. Las columnas siguientes el programa las calcula internamente.

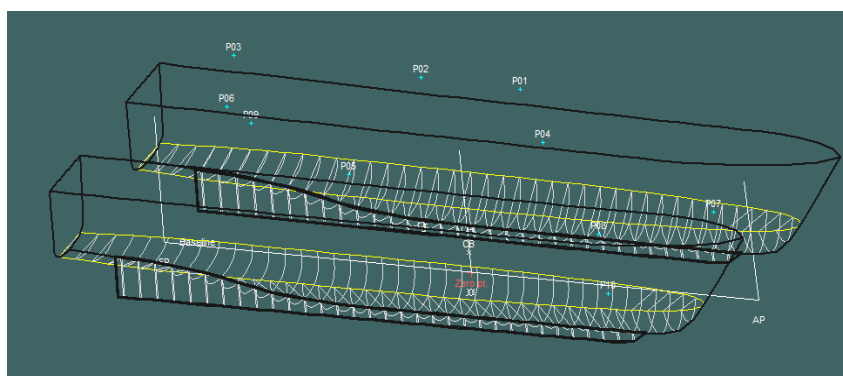



Figura 0.17: Ubicación de los puntos de análisis en el modelo.

- Velocidades de análisis

Se definen las velocidades que se desean analizar y se las identifica por un nombre

 a fin de reconocerlas fácilmente en la interpretación de resultados.

Locations
Speeds
Headings
Spectra

	Name	Speed [kn]	Analyse
1	Min	8.000	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Max	10.000	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 0.18: Velocidades de análisis.

- Direcciones de ola respecto del buque

Considerando que el análisis es en mar irregular, las direcciones de las olas son relativas a la trayectoria del buque. Considerando un rango de 0 a 180 grados.

	Name	Heading [rad]	Analyse
1	A00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
2	A30	0.52	<input checked="" type="checkbox"/>
3	A60	1.05	<input checked="" type="checkbox"/>
4	A90	1.57	<input checked="" type="checkbox"/>
5	A120	2.09	<input checked="" type="checkbox"/>
6	A150	2.62	<input checked="" type="checkbox"/>
7	A180	3.14	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 0.19: Direcciones de olas respecto al buque.

En la primera columna se especifica el nombre de cada dirección de ola, en la siguiente se especifica la dirección de ola con respecto al buque en rad.

- Espectro de Mar

El espectro de mar se puede seleccionar en cinco espectros diferentes, mencionados a continuación:

Espectro	Altura significativa, m	Periodo modal, s	Factor máximo de mejora	Velocidad del viento, nudos
ITTC dos parámetros - Bretschneider	Requerido	Requerido	1	No aplica
1 parámetro Bretschneider	Requerido	Especificado por método	1	No aplica
Jonswap	Requerido	Requerido	3.3	No aplica
DNV	Requerido	Requerido	1 - 5	No aplica
Pierson Moskowitz	Estimado por Maxsurf	Estimado por Maxsurf	No aplica	Requerido

Tabla 0.1: Espectros de mar empleados en el software Maxsurf Motion.

En este proyecto se seleccionó el espectro ITTC dos parámetros, para espectro de las 3 y 4, detallados a continuación:

	Name	Type	Char. height [m]	Modal period [s]	Average period [s]
1	SS3	ITTC(2 Param.	1.098	5.292 s	4.089 s
2	SS4	ITTC(2 Param.	2.013	7.191 s	5.556 s
3		Pierson Mosk	0.534	3.652 s	2.822 s

Figura 0.20: Espectro de mar ITTC dos parámetros.

Una vez ingresados todos los parámetros de análisis, se procede a ejecutar el programa a fin de obtener los resultados.

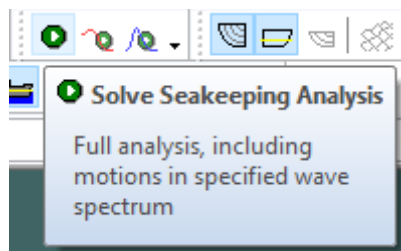



Figura 0.21: Solución de análisis de seakeeping.

Obtención de resultados

Los resultados se pueden obtener en formato tabular y gráficamente.

- Formato tabular

Los resultados que se muestran  en la Figura 0.22 corresponden a la condición seleccionada en la barra de herramientas Resultados:

Max, 10 kn; A180, 3.14 rad; SS4 (ITTC(2 Param. Pierson Moskowitz/Bretschneider): 7.191 s, 2.013 m)											
	Item	m0	units	RMS	units	Significant amp	units	Modal (peak) T_0 (w_0)	Mean (centroid) T_bar (w_bar)	Mean zero-crossing T_z (w_z)	Period units (Frequency units)
1	Modal period	7.187	s	--	--	--	--	--	--	--	--
2	Characteristic wave height	2.013	m	--	--	--	--	--	--	--	--
3	Spectrum type	ITTC(2 Param. Pi		--	--	--	--	--	--	--	--
4	Wave heading	3.140	rad	--	--	--	--	--	--	--	--
5	Vessel Speed	10.000	kn	--	--	--	--	--	--	--	--
6	Demihull displacement	110.687	m^3	Catamaran demi	--	7.400	m	--	--	--	--
7	Vessel GMt	32.427	m	--	--	--	--	--	--	--	--
8	Vessel trim	0.000	rad	--	--	--	--	--	--	--	--
9	Vessel heel	0.000	rad	--	--	--	--	--	--	--	--
10	Transom method	Transom terms		--	--	--	--	--	--	--	--
11	Wave force method	Arbitrary wave		--	--	--	--	--	--	--	--
12	Added res. method	Salvesen		--	--	--	--	--	--	--	--
13	Pitch gyradius	6.999	m	--	--	--	--	--	--	--	--
14	Roll gyradius	4.201	m	--	--	--	--	--	--	--	--
15	Wave spectrum	0.253	m^2	0.503	m	1.006	m	7.190 (0.87)	5.555 (1.13)	5.139 (1.22)	s (rad/s)
16	Encountered wave spectrum	0.253	m^2	0.503	m	1.006	m	5.078 (1.24)	3.280 (1.92)	2.600 (2.42)	s (rad/s)
17	Added resistance	16.849	kN	--	--	--	--	4.177 (1.50)	3.299 (1.90)	2.766 (2.27)	s (rad/s)
18	Heave motion	0.447	m^2	0.669	m	1.337	m	4.024 (1.56)	4.029 (1.56)	3.924 (1.60)	s (rad/s)
19	Roll motion	0.00000	rad^2	0.00008	rad	0.00017	rad	3.825 (1.64)	3.868 (1.62)	3.793 (1.66)	s (rad/s)
20	Pitch motion	0.00151	rad^2	0.03890	rad	0.07781	rad	4.022 (1.56)	3.694 (1.70)	3.581 (1.75)	s (rad/s)
21	Heave velocity	1.146	m^2/s^2	1.070	m/s	2.141	m/s	3.644 (1.72)	3.640 (1.73)	3.560 (1.76)	s (rad/s)
22	Roll velocity	0.00000	(rad/s)^2	0.00014	rad/s	0.00028	rad/s	3.644 (1.72)	3.549 (1.77)	3.382 (1.86)	s (rad/s)
23	Pitch velocity	0.00466	(rad/s)^2	0.06825	rad/s	0.13650	rad/s	3.644 (1.72)	3.266 (1.92)	3.167 (1.98)	s (rad/s)
24	Heave acceleration	3.569	m^2/s^4	1.889	m/s^2	3.778	m/s^2	3.331 (1.89)	3.337 (1.88)	3.257 (1.93)	s (rad/s)
25	Roll acceleration	0.00000	(rad/s/s)^2	0.00026	rad/s/s	0.00052	rad/s/s	3.487 (1.80)	2.378 (2.64)	1.695 (3.71)	s (rad/s)
26	Pitch acceleration	0.01834	(rad/s/s)^2	0.13541	rad/s/s	0.27083	rad/s/s	3.158 (1.99)	2.853 (2.20)	2.680 (2.34)	s (rad/s)
27	P01: Abs. vert. motion	0.541	m^2	0.735	m	1.471	m	4.024 (1.56)	4.045 (1.55)	3.943 (1.59)	s (rad/s)
28	P01: Rel. vert. motion	0.300	m^2	0.548	m	1.095	m	3.331 (1.89)	2.889 (2.18)	2.633 (2.39)	s (rad/s)
29	P01: Abs. vert. velocity	1.373	m^2/s^2	1.172	m/s	2.343	m/s	3.644 (1.72)	3.664 (1.71)	3.585 (1.75)	s (rad/s)

Figura 0.22: Resultados en forma tabular para cada condición de análisis.

Las 13 primeras filas describen las condiciones especificadas para el análisis: período modal del espectro de la ola, altura significativa de la ola, característica del espectro de mar, tipo de espectro, velocidad del buque, desplazamiento del buque, método de análisis y radio de giro. Las siguientes 9 filas dan el área bajo la curva de la amplitud de balance y cabeceo, velocidades y aceleraciones. Los movimientos verticales absolutos y relativos, las velocidades y aceleraciones se dan para todas las posiciones de análisis especificadas.

- Gráficamente

Todos los resultados obtenidos tubularmente se pueden observar de manera gráfica

 , los cuales están dados a continuación:

- MSI
- RAO's respecto al centro de gravedad
- Espectros con respecto al centro de gravedad
- RAO's respecto al punto de análisis
- Espectros con respecto al punto de análisis
- Global Hydrodynamics
- Section Hydrodynamics

Para obtener el grafico deseado se debe realizar lo siguiente:

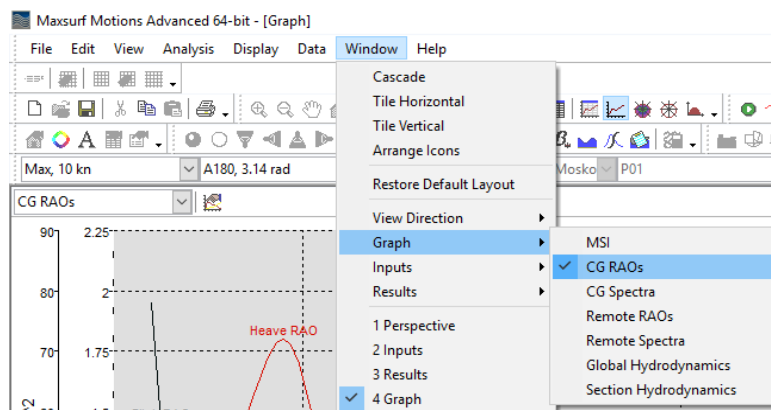


Figura 0.23: Graficación de resultados.

Una vez escogido el tipo de grafico que se pretende analizar, se debe elegir que se desea graficar en el eje X ,y, en el eje Y.

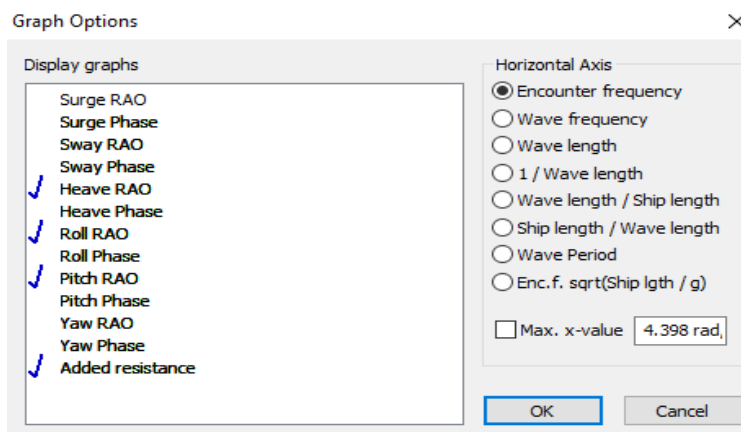



Figura 0.24: Selección de opciones a graficar.

Los datos de selección se pueden graficar en función de las opciones que se encuentran del lado derecho en la figura 24. Es posible acceder de manera rápida a algunas de las opciones de gráficos utilizando la barra de herramientas gráfico:



Utilice el cuadro combinado para seleccionar los datos a graficar y el botón  para editar los datos que se muestran en el eje horizontal y ajustar la escala.

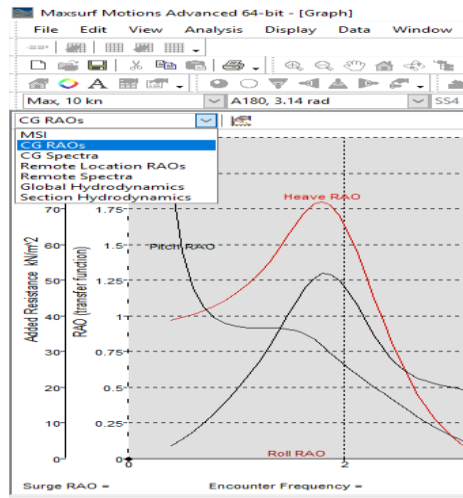


Figura 0.25: Selección del tipo de gráfico.