

Análisis de los aspectos Operacionales y de Comportamiento en Olas en el Diseño de Embarcaciones de Apoyo tipo PSV para el Caribe Colombiano

CINTHYA M. MEDINA RODRÍGUEZ

CÓDIGO. T00026936



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARTAGENA, D.T Y C. COLOMBIA
AÑO 2016**

Análisis de los aspectos Operacionales y de Comportamiento en Olas en el Diseño de Embarcaciones de Apoyo tipo PSV para el Caribe Colombiano

CINTHYA M. MEDINA RODRÍGUEZ

CÓDIGO. T00026936

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR:

JAIRO H. CABRERA TOVAR, PH. D

DOCTOR EN INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARTAGENA, COLOMBIA
AÑO 2015**

Título en español

Análisis de los aspectos Operacionales y de Comportamiento en Olas en el Diseño de Embarcaciones de Apoyo tipo PSV para el Caribe Colombiano

Resumen: Colombia actualmente se encuentra en la búsqueda de hidrocarburos en el mar como nuevas fronteras exploratorias de manera a incorporar nuevas reservas de petróleo y gas. Con el inicio de las operaciones marítimas, surge la necesidad de disponer de grandes estructuras offshore que permitan la extracción y separación del petróleo antes de su envío a tierra. La mayoría de estas plataformas requiere de determinadas embarcaciones de apoyo y abastecimiento, transportando una gran variedad de cargas, desde líquidas y a granel, hasta cargas generales, además de diversas actividades específicas como remolque, rescate de personas en caso de accidentes, combate a incendios y manejo de anclas de posicionamiento. En la industria Offshore se conoce a este tipo de embarcaciones como PSV's (Platform Supply Vessels). Este trabajo tiene como objetivo principal el diseño de embarcaciones tipo PSV's que se adapten a las condiciones ambientales y operativas del Caribe Colombiano, Bloque Tayrona.

Palabras claves: Costa Afuera, Operaciones y Comportamiento en el Mar, PSV.

Title in English

Analysis of Operational and Seakeeping aspects in the Design of PSV type for the Colombian Caribbean Sea

Abstract: The Colombia is currently in the search for oil and gas on the sea as new exploratory frontiers so as to incorporate new reserves. With the beginning of maritime operations, the need to dispose of large offshore structures that allow the extraction and separation of oil and gas before transport to land. Most of these platforms require specific support and supply vessels, carrying a variety of loads, from liquid and bulk up general cargo, and various specific activities such as towing, rescue people in case of accidents, firefighting and positioning anchor handling. In the offshore industry is known as PSV (Platform Supply Vessels). This work has as main goal the design of PSV's type to suit the environmental and operational conditions of the Colombian Caribbean Sea, Tayrona Block.

Keywords: Offshore Operations, Seakeeping, PSV.

Nota de aceptación

Trabajo de tesis

Jurado

Jurado

Director
Jairo H. Cabrera Tovar, Ph.D.

Cartagena, D.T. y C., Enero de 2016

27 Enero de 2016

Cesión de derechos patrimoniales

Cordial Saludo:

Manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado *Análisis de los aspectos Operacionales y de Comportamiento en Olas en el Diseño de Embarcaciones de Apoyo tipo PSV para el Caribe Colombiano*, producto de mi actividad académica para optar el título *de Ingeniero Mecánico* de la misma institución.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la mencionada ley. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la misma ley. En concordancia, suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Atentamente,

Cintha M. Medina Rodríguez

Enero 2016

Señores

Universidad Tecnológica de Bolívar

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Mecánica

Comité evaluador de trabajos de grado

Cordial saludo:

Por medio de la presente, permito someter a su consideración el Trabajo de Grado titulado

Análisis de los aspectos Operacionales y de Comportamiento en Olas en el Diseño de

Embarcaciones de Apoyo tipo PSV para el Caribe Colombiano, requisito para optar el

título de Ingeniero Mecánico.

Atentamente,

Cinthy M. Medina Rodríguez

Enero 2016

Señores

Universidad Tecnológica de Bolívar

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Mecánica

Comité evaluador de trabajos de grado

Cordial saludo:

Por medio de la presente, permito informarles que el Trabajo de Grado titulado **Análisis de los aspectos Operacionales y de Comportamiento en Olas en el Diseño de Embarcaciones de Apoyo tipo PSV para el Caribe Colombiano**, ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos.

Como director del proyecto considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente,

Jairo H: Cabrera Tovar, Ph. D.

DEDICATORIA

A los que piensan que el conocimiento se construye a diario y que es la experiencia lo que le da la veracidad a sus palabras.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos a las personas que de una u otra forma han colaborado, contribuido y/o aportado durante el desarrollo de este trabajo y toda mi carrera profesional, ya sea de forma interesada o no.

A Ph.D. Jairo H. Cabrera Tovar, por todos sus conocimientos que me ha impartido durante el pregrado, su confianza, consejos como profesor y amigo, y la motivación para el desarrollo de este proyecto. Sin él, no hubiera sido posible.

A mi madre por todos sus esfuerzos y apoyo incondicional durante todo este camino, y a mis amigos incondicionales que me acompañaron durante todo esto Eliecer Alfonso Quintero Olmedo y Javier Ulises Cáceres Becerra.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	20
1. Planteamiento y formulación del problema.....	22
2. Objetivos	24
2.1 Objetivo General	24
2.2 Objetivos Específicos	24
3. Justificación.....	25
4. Estado del arte.....	26
5. Marco referencial	28
5.1 Marco Teórico:	28
5.2 Marco Conceptual	30
5.2.1 Tipos de Embarcaciones	31
5.2.2 Análisis de movimiento de la embarcación.....	33
5.2.3 Ecuaciones de movimiento.....	35
5.2.4 Espectros de Mar.....	36
I. Espectro de Neumann:.....	39
II. Espectro de Pierson-Moskowitz	39
III. Espectro de ITTC (International Towing Tanks Conference):	39
IV. Espectro de Bretschneider:.....	40

V. Espectro JONSWAP:	40
5.2.5 Comportamiento de la Embarcación	41
5.2.6 Cruzamiento Espectral	43
5.2.7 Criterios de Seakeeping	44
I. Embarque de agua sobre la cubierta, “Green Water”	46
II. Impacto Hidrodinámico.....	48
III. Aceleraciones en la Cubierta Principal y el Alojamiento	50
□ Criterios MSI.....	51
□ MIIS	54
IV. Emersión de la hélice del propulsor	55
6 Modelo de Análisis.....	57
7 Condición Ambiental.....	61
7.1 El mar Caribe y sus condiciones ambientales	61
7.2 Espectro de Oleaje del Caribe Colombiano	64
8. Caso Estudio: Bloque Tayrona Occidental	69
9. Resultados	72
Conclusiones.....	95
Bibliografía.....	97
Anexos.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios límites para la aceleración vertical.....	52
Tabla 2. Criterios de desempeño personal típicos para buque	52
Tabla 3. Condiciones ambientales del Bloque Tayrona	68
Tabla 4. Dimensiones principales de la embarcación	70
Tabla 5. Probabilidad de las aceleraciones en la condición normal a velocidad 0 nudos.	74
Tabla 6. Probabilidad de las aceleraciones en la condición extrema a velocidad 0 nudos.....	75
Tabla 7. Probabilidad de las aceleraciones en la condición normal a velocidad de 10 nudos.....	76
Tabla 8. Probabilidad de las aceleraciones en la condición extrema a velocidad de 10 nudos.....	77
Tabla 9. Probabilidad de las aceleraciones en la condición normal a velocidad de 12 nudos.....	78
Tabla 10. Probabilidad de las aceleraciones en la condición extrema a velocidad de 12 nudos.....	79
Tabla 11. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición normal a velocidad de 0 nudos.	80
Tabla 12. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición extrema a velocidad de 0 nudos.	81

Tabla 13. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición normal a velocidad de 10 nudos.....	82
Tabla 14. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición extrema a velocidad de 10 nudos.....	83
Tabla 15. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición normal a velocidad de 12 nudos.....	84
Tabla 16. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición extrema a velocidad de 12 nudos.....	85
Tabla 17. Probabilidad de la emersión del propulsor en condición normal y extrema a velocidad de 0 nudos.....	86
Tabla 18. Probabilidad de la emersión del propulsor en condición normal y extrema a velocidad de 10 nudos.....	87
Tabla 19. Probabilidad de la emersión del propulsor en condición normal y extrema a velocidad de 12 nudos.....	88
Tabla 20. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición normal a velocidad de 0 nudos.....	89
Tabla 21. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición extrema a velocidad de 0 nudos.....	89
Tabla 22. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición normal a velocidad de 10 nudos.....	89
Tabla 23. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición extrema a velocidad de 10 nudos.....	90

Tabla 24. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición normal a velocidad de 12 nudos.....90

Tabla 25. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición extrema a velocidad de 12 nudos.....90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plataform Supply Vessel [PSV] (Martín, 2013)	32
Figura 2 . Anchor Handling Tug [AHT]. (EMAS , 2015)	33
Figura 3. Movimientos de rotación y traslación de un buque.	34
Figura 4. Sistema fluctuante con 6 grados de libertad	35
Figura 5. Respuesta RAO PSV Caso Ejemplo (10 nudos – 180°)	42
Figura 6. Puntos críticos PSV	45
Figura 7. Ejemplo de embarque de agua en la cubierta. (Tovar J. , OffshorE PSV Caribe, 2014)	47
Figura 8. Ejemplo del impacto hidrodinámico. (Tovar J. , OffshorE PSV Caribe, 2014).....	48
Figura 9. Gráfica del MSI. (PSV).....	53
Figura 10. ISO 2631. Límites de malestar Severo.	55
Figura 11. Modelo de análisis	60
Figura 12. Situacion Geografica Bloque Tayrona (REPSOL).....	67
Figura 13. Embarcación PSV de estudio	69
Figura 14. RAO (Vel. 12 nudos – 180°).	70
Figura 15. Representación graficas de las aceleraciones (condición normal, velocidad 0).....	74
Figura 16. Representación graficas de las aceleraciones (condición extrema, velocidad 0).....	75
Figura 17. Representación graficas de las aceleraciones (condición normal, velocidad 10).....	76

Figura 18. Representación graficas de las aceleraciones (condición extrema, velocidad 10).....	77
Figura 19. Representación graficas de las aceleraciones (condición normal, velocidad 12).....	78
Figura 20. Representación graficas de las aceleraciones (condición extrema, velocidad 12).....	79
Figura 21. Representación graficas del embarque de agua sobre cubierta (condición normal, velocidad 0)	80
Figura 22. Representación graficas del embarque de agua sobre cubierta (condición extrema, velocidad 0).....	81
Figura 23. Representación graficas del embarque de agua sobre cubierta (condición normal, velocidad 10).....	82
Figura 24. Representación graficas del embarque de agua sobre cubierta (condición extrema, velocidad 10)	83
Figura 25. Representación graficas del embarque de agua sobre cubierta (condición normal, velocidad 12).....	84
Figura 26. Representación graficas el embarque de agua sobre cubierta (condición extrema, velocidad 12)	85
Figura 27. Representación graficas de la emersión del propulsor (condición normal y extrema, velocidad 0).....	86
Figura 28. Representación graficas de la emersión del propulsor (condición normal y extrema, velocidad 10).....	87

Figura 29. Representación graficas de la emersión del propulsor (condición normal y extrema, velocidad 12)	88
Figura 30. RMS Heave Aceleración condición normal.....	91
Figura 31. RMS Heave Aceleración, condición extrema	93

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Sistema de ecuación diferencial	35
Ecuación 2. Modelo probabilístico	37
Ecuación 3. Momento espectral de orden cero	37
Ecuación 4. Desviación estándar	37
Ecuación 5. Periodo de cruce por cero	37
Ecuación 6. Periodo medio	38
Ecuación 7. Altura de ola significativa.....	38
Ecuación 8. Espectro de Newman	39
Ecuación 9. Espectro de Pierson-Moskowitz.....	39
Ecuación 10. Espectro ITTC	40
Ecuación 11. Espectro de Bretschneider	40
Ecuación 12. Espectro JONSWAP	40
Ecuación 13. Cruzamiento espectral	43
Ecuación 14. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta.....	47
Ecuación 15. Probabilidad del Impacto Hidrodinámico.....	49
Ecuación 16. Probabilidad de las Aceleraciones sobre Cubierta.....	50
Ecuación 17. Probabilidad de la Emersión del Propulsor	55

Introducción

Colombia se viene convirtiendo en un país líder en la producción de petróleo crudo en Suramérica, lo que le ha permitido alearse con diferentes empresas extranjeras para realizar los procesos de sísmica y explotación de yacimientos de gas o petróleo.

De acuerdo con Tovar J. (Tovar J. , Offshore_PSV_Caribe, 2014), el sector de los hidrocarburos, ha sido la punta de lanza de la estrategia del país, por parte del Gobierno Nacional, pasando de US\$ 277 millones en flujos de inversión extranjera en 2003 a US\$ 2633 millones en 2009. Este sector se encuentra en un agresivo plan de inversiones en exploración y producción, enfocado en aumentar el mayor índice de aprovechamiento de los yacimientos ya encontrados, ampliar la infraestructura de transporte para agilizar la producción de los nuevos hallazgos y en incrementar su presencia en el Caribe con recientes contratos de exploración offshore.

Los hechos y las cifras demuestran que la actividad petrolera esta con los motores encendidos y que Colombia es cada vez más atractiva para la inversión extranjera dentro del panorama latinoamericano. Por lo que, “el repunte en perforaciones es el resultado en buena medida del liderazgo” asumido por las empresas del medio petrolífero. Colombia es un país que produce al día algo menos de un millón de barriles diarios pero con un potencial de 47 mil millones de barriles en reserva. Cabe resaltar que en las profundidades

del mar Caribe es donde se encuentra el foco de atención principal de importantes empresas como Ecopetrol, Exxon Mobil y Petrobras”. (Tovar & Cárdenas, 2006, págs. 12-15)

Es el mar Caribe uno de los principales objetivos de las grandes empresas del sector, por lo tanto se deben realizar diferentes estudios relacionados con los servicios de apoyo que estas nuevas infraestructuras offshore van a demandar.

Con el inicio de las operaciones de exploración de petróleo y gas en el mar, surge la necesidad de disponer de grandes estructuras offshore que permitan la extracción y separación del petróleo antes de su envío a tierra, plataformas que requieren para su operación diaria, embarcaciones de apoyo y abastecimiento, que puedan transportar una gran variedad de cargas, desde líquidas y a granel, hasta cargas generales, como tuberías y piezas diversas, además de servir a diversas actividades específicas como remolque, rescate de personas en caso de accidentes, combate a incendios y manejo de anclas de posicionamiento.

En el diseño de este tipo de embarcaciones se deben considerar características especiales correspondientes a las condiciones de mar de las regiones de operación, a través de un análisis espectral. Este trabajo tiene como principal objetivo analizar el comportamiento en el mar de embarcaciones de apoyo que se adapten a las condiciones de oleaje propias de una determinada localización de interés.

1. Planteamiento y formulación del problema

Con el crecimiento de la producción de crudo en Colombia ya se ha empezado a mirar el mar como una fuente importante para la exploración *offshore*, todo con el fin de aumentar la producción de hidrocarburos y convertirnos en el foco de atención de las grandes empresas del sector.

La gran problemática que surge al incursionar en esta área es el poco conocimiento que se tiene acerca de las estructuras y embarcaciones que prestan apoyo a las plataformas que se encuentran mar adentro y que necesitan de una variedad de recursos a diario para cumplir con todos sus propósitos.

Este es un campo que ha sido poco explorado en Colombia pero que tiene una amplia proyección por la necesidad actual de encontrar nuevos yacimientos de hidrocarburos y de aumentar las reservas de estos preciados recursos.

Actualmente no es suficiente con la exploración y producción en el *onshore* colombiano, luego se torna imprescindible incursionar mar adentro y demostrar que es la zona offshore del Caribe, el foco principal para retomar dichas operaciones. Actualmente contamos con un único sistema offshore de producción en el país orientado completamente a la explotación de gas natural.

Es por estas y muchas otras razones que esta investigación está guiada a proporcionar una memoria de cálculo para aportar en el diseño del tipo de embarcación adecuada para prestar apoyo logístico a las plataformas petroleras para una región específica en el Caribe colombiano.

¿Es posible analizar los aspectos operacionales y de comportamiento en olas en el diseño de embarcaciones de apoyo tipo PSV para el Caribe colombiano?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar los aspectos Operacionales y de Comportamiento en Olas en el Diseño de Embarcaciones de Apoyo tipo PSV para el Caribe colombiano.

2.2 Objetivos Específicos

- Entender el comportamiento del mar caribe colombiano para obtener la información suficiente y necesaria en el diseño de un embarcación tipo PSV
- Establecer el espectro del mar Caribe colombiano que represente las características ambientales de las áreas de operación de interés para conocer el comportamiento hidrodinámico de las embarcaciones tipo PSV
- Evaluar el comportamiento hidrodinámico de una embarcación tipo PSV en el mar Caribe colombiano basado en criterios probabilísticos.

3. Justificación

Este proyecto se vuelve relevante para la comunidad y la región, debido a que el mar caribe colombiano posee un potencial muy alto para las futuras rondas de exploración petroleras que realizan las grandes empresas de esta industria, lo que llevaría a generar fuentes de trabajo al sector naval actualmente limitado al personal de la armada nacional.

Actualmente las proyecciones en la industria offshore son promisorias y cuanto más preparados garantizara un avance en estas actividades.

Es de especial importancia estudiar el comportamiento de las embarcaciones de apoyo logístico a las plataformas ya que son estas las que consiguen tener un contacto directo con la unidad de exploración y/o producción, son las que tienen un diseño específico que permiten tener un contacto entre los procesos que se llevan en la plataformas y la tripulación de estas, además de que las embarcaciones tienen un diseño específico para enfrentar las condiciones ambientales para las que ha sido diseñada.

4. Estado del arte

Para todo proceso de investigación se hace necesario de una serie de teorías que fundamenten los análisis que se realizan todo con el fin de darle un carácter verídico a lo que se está realizando, pero también se hacen necesarios de ciertas investigaciones que permitan observar y revisar que procesos se han realizado con anterioridad y la existencia de memorias de información y datos las cuales sirven de base para dar inicio a una nueva investigación.

Para el análisis del comportamiento en el mar de una PSV no existen registros referenciales previos en Colombia porque este no es un tipo de embarcación que se haya diseñado ni aún menos construida en el país, así como no es tampoco muy frecuente su presencia actual en Colombia. Importante es resaltar que su metodología de diseño parte de un proceso que es similar para todos los tipos de embarcaciones. Siguen a continuación ejemplos de 3 referencias que permiten observar que los fundamentos del proceso de análisis de comportamiento en el mar es el mismo, las especificaciones dependen del tipo de embarcación y su funcionalidad para la cual se encuentra diseñada, sin embargo, los criterios de análisis básicamente son los mismos.

El desarrollo de investigaciones de comportamiento de embarcaciones en el mar se fundamenta principalmente en la teoría de fajas o Strip Theory tal como afirma Couselo, A.

(Couselo, 2015), evaluando el comportamiento de embarcaciones de alta velocidad, en función de que el cálculo basado en la teoría de fajas es extenso e iterativo, por lo que se usan programas computacionales que optimizan el proceso de análisis. Herramientas que permiten obtener las funciones RAO de *Pitch*, *Heave* y *Roll*, y además considerando un espectro de energía de mar como JONSWAP, con lo que se consigue finalmente el espectro de embarcaciones en un mar irregular, con el que se calculan aceleraciones, velocidades, alturas media de ola , entre otros resultados.

Una metodología para predecir el comportamiento de una embarcación es igualmente presentada por Gamarra *et al.* (Gamarra, Yarin, Yarin, & Palacios, 2011), para una embarcación de desplazamiento tipo pesquero de bajas velocidades. En este trabajo se evalúan los efectos perjudiciales para su desempeño, como lo son la emersión del propulsor, embarque de agua en la cubierta, *slamming* y excesivas aceleraciones verticales.

En el trabajo de investigación de Medina (Medina, 2016), se desarrolla una metodología de análisis para predecir el comportamiento en el mar de una patrullera de costa en su fase de diseño conceptual, metodología fundamentada en los criterios establecidos por el STANAG (Eriksen, 2000).

5. Marco referencial

5.1 Marco Teórico:

Las grandes innovaciones en los conceptos y procesos para el diseño, construcción y puesta en servicio de buques y embarcaciones navales, se han originado tradicionalmente en proyectos militares, y precisamente ha sido la Marina de guerra de los Estados Unidos la que ha liderado este cambio.

La tendencia actual para la definición de proyectos de diseño de buques está basada en la aplicación de conceptos de la Ingeniería Sistémica (Systems Engineering); en lo relacionado con la integración de los componentes, subsistemas y sistemas con la misión del buque se aborda en el marco de la Ingeniería Sistémica Total del Buque (Total Ship Systems Engineering).

La forma tradicional de realizar el diseño de un buque se basa en la conocida espiral de diseño de Evans, esta metodología es la más extendida para diseñar buques en todo el mundo. Este método se basa en la idea de que diferentes características de desempeño que definen el buque se pueden ir especificando de forma secuencial en niveles incrementales durante varias vueltas a la espiral hasta que se logra un equilibrio en el diseño que satisfaga todas las consideraciones y restricciones.

Esta aproximación se conoce como diseño basado en punto, "point based design" y el resultado solamente ocupa un punto del espacio de diseño; es un diseño base que puede ser desarrollado todavía más detalladamente o también puede ser considerado como el punto inicial para un estudio de relación de compromisos (trade-off), la obvia desventaja de esta aproximación al diseño es que si bien el resultado es perfectamente un buque factible, este no es en definitiva un óptimo global del espacio de diseño.

Esta nueva técnica de diseño implica la definición inicial de grandes conjuntos de parámetros de desempeño con base en el desarrollo de un proceso de recolección de requerimientos y de caracterización de la misión, así como de operaciones típicas del buque, lo cual se hace durante la etapa de Exploración de Concepto y Diseño Conceptual.

Esta información es plasmada en requerimientos de alto nivel, es decir de carácter conceptual y no en base a funcionalidades específicas, lo cual permite hacer comparaciones y relaciones de compromisos que permiten evidenciar los parámetros claves de desempeño, es decir, características fundamentales de desempeño del buque que impactan fuertemente la capacidad del buque para cumplir su misión.

El resultado de este no es un solo punto, sino un conjunto de puntos que puede llegar a ser miles o cientos de miles si se desarrolla por ejemplo un modelo de síntesis que genere opciones con base a un modelo de restricciones. Estos puntos son ubicados en el espacio de diseño y mediante técnicas de optimización los mejores diseños son llevados a un nuevo ciclo de refinamiento hasta que este se reduce a uno solo un punto óptimo, el cual es llevado a la etapa de diseño preliminar en donde se define funcionalmente el buque.

Para el desarrollo de este proyecto se seguirá implementando esta nueva técnica de diseño es la misma utilizada por las empresas del sector para el diseño de cada una de sus embarcaciones, en este sentido mediante la exploración de conceptos se aplicara esta metodologías de soporte para la toma de decisiones, desarrollo del análisis, modelación sintética, teoría de optimización y demás herramientas modernas de tecnología orientada al diseño de buques.

5.2 Marco Conceptual

El marco conceptual de este proyecto muestra la teoría que se hizo necesaria para el análisis del comportamiento en el mar de una embarcación tipo PSV para el caribe colombiano. Esta teoría va guiada a mostrar los requerimientos que se deben seguir para cumplir con los requisitos que se exigen para el diseño de una embarcación de este tipo.

5.2.1 Tipos de Embarcaciones

Offshore Support Vessels (OSV) o también conocidos como **Plataform Supply Vessel (PSV)**, son barcos especialmente diseñados para suministrar apoyo logístico a las plataformas marítimas de petróleo, este tipo de embarcación se muestra en la figura 1. De acuerdo con Martín (Martín, 2013), la función principal de estos barcos es la carga y transporte de bienes y personas desde y hacia las plataformas petroleras en alta mar y otras estructuras costa afuera.

La industria offshore requiere ciertas misiones específicas que se pueden realizar por diversos tipos de buques. Los factores que caracterizan a este mercado son las fluctuaciones en las tasas de alquiler por día, variaciones estacionales debido a las condiciones cambiantes del clima e igualmente a la variedad del tamaño y velocidad de las embarcaciones. “El alto nivel de complejidad, junto con los avances en tecnología y las condiciones extremas de funcionamiento crean un cuidadoso desarrollo de las tareas de diseño e ingeniería de estos buques” según (Tvedt, 2012). La figura 1 es un ejemplo de este tipo de embarcación.



Figura 1. Plataform Supply Vessel [PSV] (Martín, 2013)

Anchor Handling Tug [AHT]: “Estos buques están diseñados para satisfacer las duras condiciones del mar del Norte y puede realizar tareas de abastecimiento entre las bases de la tierra y los sitios de perforación. También proporcionan asistencia de remolque durante la carga del petrolero, manejo de anclas en aguas profundas y remolque de objetos amenazantes (EMAS , 2015). La figura 2 muestra un ejemplo de este tipo de embarcaciones.



Figura 2. Anchor Handling Tug [AHT]. (EMAS , 2015)

5.2.2 Análisis de movimiento de la embarcación

Una embarcación puede ser considerada como un sistema vibratorio complejo con 6 grados de libertad que son a menudo referidos a los modos de un cuerpo rígido. Estos pueden ser divididos en dos grupos: los movimientos trasnacionales o lineales: *surge*, *sway*, *heave* y los movimientos rotacionales: *roll*, *pitch* y *yaw* tal como se muestra en la figura 3. Adicionalmente si la flexibilidad de la embarcación es significativa debe ser apropiado considerar la respuesta hidroelástica.

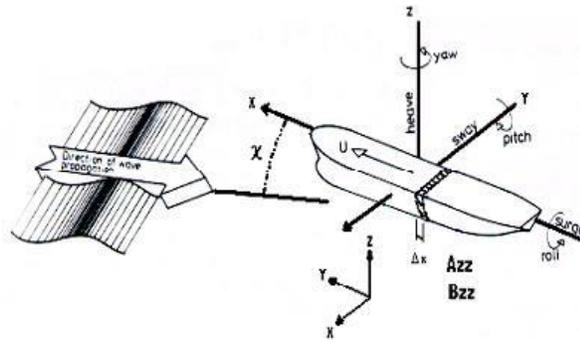


Figura 3. Movimientos de rotación y traslación de un buque. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

Los buques son sistemas que están sometidos a diferentes fuerzas, como lo son las olas, el viento y el desplazamiento mismo de este, lo que produce movimientos de traslación y rotación, de acuerdo a la figura 3, se presentan a continuación los diferentes movimientos que son característicos en una embarcación y su simbología correspondiente.

Movimientos de traslación

- a) SURGE (x) = Avanzo
- b) SWAY (y) = Deriva
- c) HEAVE (z) = Hundimiento

Movimientos de rotación

- d) ROLL (φ)= Rolado
- e) PITCH (ψ)= Cabeceo
- f) YAW (χ)= Guiñada

5.2.3 Ecuaciones de movimiento

La ecuación de balance simplemente lo que expresa es la sumatoria de los momentos recuperadores del buque y que estos deben ser iguales a las fuerzas externas que se ejercen sobre él. El sistema de ecuaciones diferenciales para un sistema fluctuante con 6 grados de libertad se muestra en la figura 4 y numéricamente en la Ecuación 1.

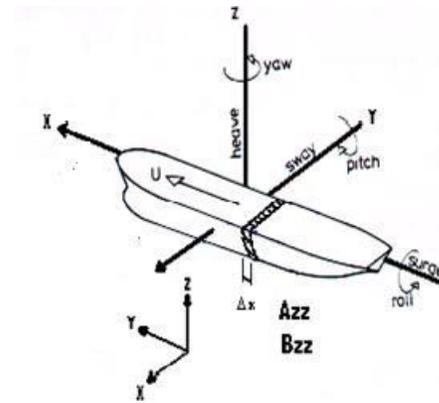


Figura 4. Sistema fluctuante con 6 grados de libertad. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \cdot \ddot{\eta}_k + (B_{jk} \cdot \dot{\eta}_k) + (C_{jk} + \eta_k)] = F_j \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t}$$

Ecuación 1. Sistema de ecuación diferencial

Donde:

j, k indican los modos de movimiento

A_{jk} es la matriz de masa adicionada

B_{jk} es la matriz de amortiguamiento

C_{jk} es la matriz de restauración

η_k es el vector de amplitud de movimiento

F_j es el vector de fuerza de olas

ω es la frecuencia de excitación en rad/s

t es el tiempo

Sistema de ecuaciones diferenciales para un sistema fluctuante (6 grados)

5.2.4 Espectros de Mar

“El espectro de mar es el modelo matemático que brinda algunos significados de orden estático a una superficie de mar caótico, mediante la identificación de mares regulares; si las olas son irregulares, la energía podría ser expresada en términos de la amplitud de la ola o de la varianza de la superficie de elevación de esta, para el caso de las olas irregulares el total de la energía por unidad de área es la suma de las energías asociadas con cada una de las olas irregulares ”. (Zubaly, 1996)

Los modelos de análisis de comportamiento de mar de embarcaciones se fundamentan inicialmente en la descripción a través de sus espectros, el comportamiento de la embarcación representado por sus RAOs y el cruzamiento espectral considerando los mares aleatorios.

Modelo probabilístico:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S(\omega) \cdot d\omega$$

Ecuación 2. Modelo probabilístico

El momento espectral de orden cero m_0 es de vital importancia y es equivalente al área bajo la curva del espectro de la ola, el cual es la varianza de la serie de tiempo del oleaje evaluada.

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega) \cdot d\omega$$

Ecuación 3. Momento espectral de orden cero

La desviación estándar está dada por:

$$\sigma = \sqrt{m_0}$$

Ecuación 4. Desviación estándar

Período de cruce por cero “Up-zero Crossing”

$$T_z = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

Ecuación 5. Periodo de cruce por cero

Periodo Medio, puede ser encontrado para calcular el centro del área del espectro de energía y está dado por:

$$T_M = 2. \pi. \frac{m_0}{m_1}$$

Ecuación 6. Periodo medio

La altura de ola significativa “ H_s ” representa la media del tercio superior de las mayores alturas de mar.

$$H_s = 4. \sigma = 4\sqrt{m_0}$$

Ecuación 7. Altura de ola significativa

Donde:

$H_s (m)$ – Altura significativa

Existen diferentes modelos analíticos para analizar el espectro, pero para esta investigación se utilizara el Espectro JONSWAP. A continuación se mostraran los diferentes modelos:

I. Espectro de Neumann:

$$S(\omega) = \frac{AB}{\omega^6} \cdot e^{\frac{B}{\omega^2}}$$

Ecuación 8. Espectro de Newman

Donde:

A y B dependen de velocidad del viento V_w .

II. Espectro de Pierson-Moskowitz

“este es un espectro que se ajusta a aguas profundas y mares completamente desarrollados”. (Vidal)

$$S(\omega) = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} g^2}{\omega^5} \cdot e^{-0,74 \left(\frac{B}{\omega^2}\right)^4}$$

Ecuación 9. Espectro de Pierson-Moskowitz

Donde:

ω es la frecuencia circular de las ondas

V_w ES la velocidad del viento.

III. Espectro de ITTC (International Towing Tanks Conference):

La Conferencia Internacional de tanques de remolque es una asociación voluntaria de organizaciones en todo el mundo que tienen responsabilidad en la predicción del comportamiento hidrodinámico de los buques y de las instalaciones marinas con base en los

resultados de la modelización física y numérica. (ITTC International Towing Tanks Conference , 2015).

$$S(\omega) = \frac{8,1 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} \cdot e^{-\frac{(3,11/h_{1/3})^{-2}}{\omega^4}}$$

Ecuación 10. Espectro ITTC

Se usa la única información disponible que es $H_{1/3}$;

IV. Espectro de Bretschneider:

$$S(\omega) = \frac{\left[\frac{172,75 h_{1/3}^{-2}}{T_1^4} \right]}{\omega^5} \cdot e^{-\left(\frac{691}{T_1^4} \right)}$$

Ecuación 11. Espectro de Bretschneider

Se utiliza cuando la información disponible son la altura y el período.

V. Espectro JONSWAP:

$$S_j(\omega) = 0,658 * C * S_B(\omega)$$

Ecuación 12. Espectro JONSWAP

El modelo espectral JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) fue un estudio realizado para analizar cuánticamente algunos de los fenómenos que intervienen en la generación del oleaje en el mar del Norte. Fue planteado para disponer de información suficiente en extensión y densidad del mar caribe colombiano, sobre condiciones de los espectros del oleaje en esta área para poder determinar su comportamiento. Este es un espectro ajustado a las condiciones ambientales de la región caribe colombiana.

Está basado en el espectro de Bretschneider de dos parámetros, los cuales son la altura característica del estado de mar o altura significativa de la ola (H_s) y el periodo medio del oleaje (T_M)

5.2.5 Comportamiento de la Embarcación

El comportamiento de la embarcación, en olas regulares es representado a través de los RAO (Response Amplitude Operator). Este es un operador lineal que representa la función de transferencia entrada (ola) – salida (movimiento) siendo de fundamental relevancia en la determinación de parámetros de diseño de una embarcación.

El RAO describe como varía la respuesta de la embarcación con las variaciones de frecuencia. Un ejemplo clásico de una respuesta RAO es representada por la figura 5.

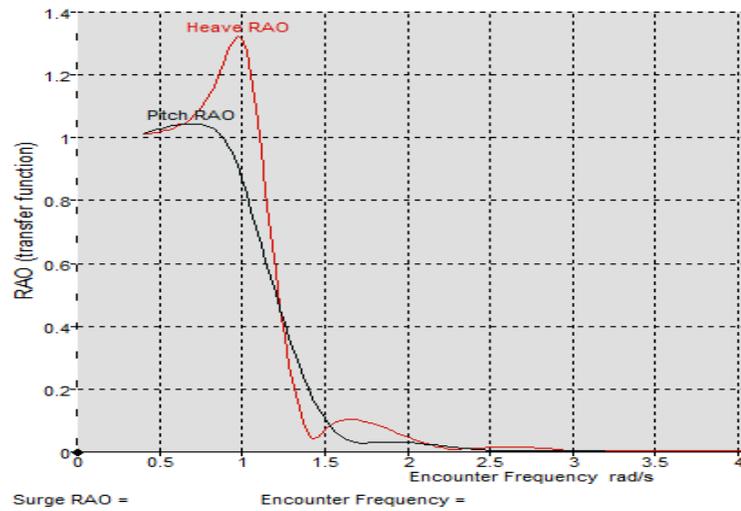


Figura 5. Respuesta RAO PSV Caso Ejemplo (10 nudos – 180°)

Puede verse como el RAO tiende a la unidad para frecuencias bajas y es donde el buque se mueve arriba y abajo con la ola. Para frecuencias altas, la respuesta tiende a cero mientras el efecto de muchas ondas cortas se cancela a lo largo de la eslora del buque. Normalmente, el buque tendrá también un pico mayor que la unidad, lo que ocurre cerca del período natural de los buques. El pico es debido a la resonancia. Un valor de RAO mayor que la unidad indica que la respuesta de la embarcación es mayor que la amplitud de la ola (o que la pendiente).

5.2.6 Cruzamiento Espectral

Las características más importantes de las olas es su irregularidad en el espacio y el tiempo, por lo tanto se hace necesario para empezar este análisis seleccionar el Estado de Mar que refleja la cantidad de energía y la distribución entre las olas presentes que están incidiendo sobre la embarcación, también se hace necesario conocer los RAOs de la embarcación que simplemente son un operador de respuesta unitaria en olas irregulares. Por lo tanto el cruzamiento espectral es representado como el producto del espectro del Mar por la función de transferencia (RAO) “Response Amplitude Operator”. La energía del espectro de respuesta está definida por la Ecuación 13.

$$S_z(\omega) = [RAO]^2 * S(\omega)$$

Ecuación 13. Cruzamiento espectral

Donde:

RAO = Operador de Respuesta Unitaria en olas regulares de la embarcación para un determinado movimiento

$S(\omega)$ = Espectro de mar

$S_z(\omega)$ = Cruzamiento espectral

5.2.7 Criterios de Seakeeping

Este capítulo trata los diferentes criterios que serán importantes para el desarrollo de la investigación, estos se resumen en 4 eventos y 6 localizaciones donde se van a realizar los diferentes análisis. Las coordenadas seleccionadas en la embarcación son los adecuados para realizar las conclusiones pertinentes para evaluar el comportamiento en el mar.

El criterio de *Seakeeping* permite analizar en el buque, el embarque de agua por la proa, golpe de la proa con el mar *Slamming*, efecto de aceleraciones especialmente verticales debido al *Heave* y *Pitch*, en puntos críticos a lo largo de la eslora del buque, pérdidas de velocidad debido a la resistencia adicional existente en olas y debido a reducciones involuntarias del motor causadas por la emersión del propulsor.

Para analizar el comportamiento del mar se consideraran los siguientes criterios conocidos en la literatura como eventos:

- Embarque de agua en la cubierta, “Green Water”
- El impacto hidrodinámico o *Slamming*
- Aceleraciones en la cubierta principal y en los alojamientos
- Emersión del propulsor

Según estos análisis se eligieron seis puntos diferentes a lo largo del casco de la embarcación considerados como críticos y donde los eventos serán analizados. Las localizaciones son:

- P1 – Proa (Castillo)
- P2 – Proa (Pie de Roda)
- P3 - Propulsor
- P4 - Popa
- P5 - Cubierta principal
- P6 - Superestructura

La figura 6, representa la identificación de estos puntos críticos en una embarcación tipo PSV.

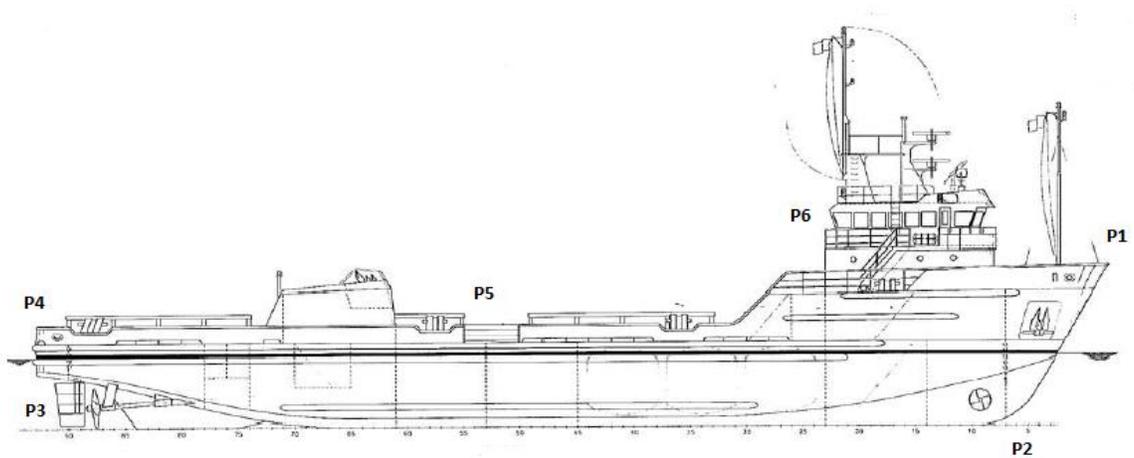


Figura 6. Puntos críticos PSV

Se utilizó el programa Maxsurf más específicamente su módulo de Seakeeper, para analizar los diversos eventos del comportamiento del buque en el mar.

De acuerdo con la teoría, el programa se fundamenta en la “Strip Theory”, donde cada sección transversal de la embarcación se aproxima por un polinomio en relación a una forma cilíndrica del casco. Esta teoría se aplica a las diferentes secciones del barco para observar las fuerzas que actúan sobre este y los comportamientos que se presentan con la incidencia de las olas sobre la estructura.

I. Embarque de agua sobre la cubierta, “Green Water”

La entrada de agua en la cubierta se produce cuando el movimiento del buque debido al nivel de agua excede la profundidad del puntal, lo que ejerce sobre la estructura de cubierta una carga debido a la masa de agua que excede el puntal., como se muestra en la figura 7.

Para este caso de estudio en específico, el diseño de un tipo de buque para apoyo offshore, el análisis se hace aún más importante debido al gran movimiento de carga y la tripulación en cubierta.

El límite predeterminado para la “ocurrencia embarque de agua en cubierta es del 5%”. Sin embargo, en el caso de los buques de apoyo, el embarque de agua en cubierta es una ocurrencia común. En este caso, el buque deberá estar diseñado para la ocurrencia más baja posible y para garantizar la seguridad de la tripulación que realiza trabajos en las cubiertas expuestas.



Figura 7. Ejemplo de embarque de agua en la cubierta. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

$$P_{gw} = \exp \left[-\frac{h^2}{2m_{0mn}} \right]$$

Ecuación 14. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta

Donde:

h : como la altura del francobordo efectiva

m_0 : como la variación del espectro de desplazamiento relativo vertical.

II. Impacto Hidrodinámico

El impacto hidrodinámico, conocido también como *Slamming*, ocurre cuando la combinación del desplazamiento y la velocidad vertical son lo suficientemente intensos como para que la respuesta de movimiento combinado *pitch* y *heave* sean amplificadas causando un impacto por la entrada de la proa al mar, como se muestra en la figura 8.



Figura 8. Ejemplo del impacto hidrodinámico. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

La información que se obtiene con relación a este evento es:

- Frecuencia de aparición de los impactos hidrodinámicos;
- Intervalo de tiempo entre los impactos

- Fuerza del impacto;
- Velocidad del buque al que se puede producir daño en el casco.

La probabilidad de ocurrencia de este evento no debe exceder de 1%.

$$P_s = \exp \left[-\frac{t^2}{2m_{0rvm}} \right] \times \exp \left[-\frac{v^2}{2m_{0rvv}} \right]$$

Ecuación 15. Probabilidad del Impacto Hidrodinámico

Donde:

t =calado en la sección media;

s = Coeficiente de longitud de ola.

m_{0rvm} = Variación del movimiento vertical relativo del espectro de proa.

m_{0rvv} =Variación del espectro de velocidad vertical relativa de proa.

v_c = Velocidad crítica deducida por Ochi, m/s. (Ochi & Motter, 1973)

III. Aceleraciones en la Cubierta Principal y el Alojamiento

Las aceleraciones deben ser verificadas en las localizaciones mencionadas anteriormente todo con el fin de que no sobre pasen los límites establecidos para que no se afecte el bienestar de la tripulación.

Existen condiciones de mar en las que la tripulación puede estar expuesta a situaciones inadecuadas que influyen en la ejecución de sus tareas.

La intensidad de las aceleraciones para diferentes localizaciones de interés se determina a partir de la ecuación 16.

$$\ddot{Z}_{1/10} = 2,55\sqrt{m_{0z}}(1 - \varepsilon^2)^{1/2}$$

Ecuación 16. Probabilidad de las Aceleraciones sobre Cubierta

Donde:

m_{0z} = área bajo el espectro de respuesta para la aceleración vertical

$$\sqrt{m_{0z}} = \text{RMS}$$

ε = valor de proyecto = 0,6

$\ddot{Z}_{1/10}$ = no debe exceder 0,5g (4,905m/s²)

❖ Criterios MSI

En el caso de embarcaciones de pasajeros es de vital importancia evaluar el confort en la navegación y este puede ser expresado como un porcentaje de mareo de los pasajeros. Las aceleraciones laterales y verticales son los principales responsables de mareo

La Tabla 1, presenta una escala de la aceleración vertical RMS que puede ser utilizada para la estimación su magnitud para diferentes actividades a bordo y para la comodidad de la tripulación y los pasajeros

Criterio Límite para la aceleración vertical

Acel. Vert. RMS (g)	Descripción
0,02	Pasajeros en un crucero. Personas mayores. Cerca del umbral inferior por debajo es poco probable el mareo.
0,05	Pasajeros en un ferry. Estándar internacional por 2 horas expuesto al periodo. Causas de movimientos de mareos en aproximadamente 10% de los adultos no aclimatados.
0,100	Trabajo intelectual para personas razonablemente adaptadas a los movimientos en un barco. Trabajo de naturaleza exigente Cognitivo/manual. Largo plazo tolerable para la tripulación. El estándar internacional para la mitad de hora de un período de exposición.
0,150	Trabajo pesado para personas adaptadas a los movimientos de una embarcación: por ejemplo, en lo buques de pesca y barcos de suministro

0,200	Trabajos livianos para personas adaptadas a los movimientos de una embarcación. No tolerable para largos periodos. Causa rápidamente la fatiga.
0,275	Trabajos simples. La mayor parte de la atención estará destinada a mantener el equilibrio. Tolerable solo para cortos periodos de naves de gran velocidad

Tabla 1. Criterios límites para la aceleración vertical. (Mccauley, 1974)

Los criterios típicos para el desempeño del personal en un buque de guerra son listados en la Tabla 2. Estos criterios se presentan como de amplitud significativa que es la media de un tercio de las más altas amplitudes y está cerca de lo que un observador entrenado podría estimar los movimientos.

Aplicación	Movimientos	Limites	Locación
General	Aceleración vertical	0,4 g	Puente
	Aceleración lateral	0,2 g	Puente
Tareas específicas	MSI	20% del personal	Ubicación de tareas
	MII	1/min	Ubicación de tareas

Tabla 2. Criterios de desempeño personal típicos para buque (Mccauley, 1974)

El concepto *Motion Sickness Indicator* (MSI) fue desarrollado en un estudio patrocinado por la Marina de Estados Unidos en la década de 1970 para investigar el efecto en los seres humanos de los movimientos del buque. La investigación intentó cuantificar la incidencia de mareos de un grupo de más de 500 personas sometidas a un movimiento vertical en diferentes amplitudes y frecuencias. Según Mccauley, “El rango de aceleración RMS y

frecuencia fue seleccionado entre 0,27 a 5,5 m/s² y 0,083 a 0,700 Hz, respectivamente”.
(Mccauley, 1974)

Los experimentos mostraron que la aparición de mareos se relacionó con la aceleración y la frecuencia, obteniéndose un índice de mareo a partir de estos datos. El valor MSI indica el porcentaje de personas que experimentaron mareos en un período de prueba de 2 horas. De acuerdo con los datos de prueba, las personas tienen significativamente menos la tolerancia al movimiento vertical entre 0,2 a 0,16 Hz (5-6 s), rango de mayor a menor frecuencias.

Los resultados de estos experimentos se expresan en términos del nivel de aceleración que causa mareo del 10% de los personas a bordo en un intervalo de tiempo específico. La figura 9, es un ejemplo de las gráficas de MSI arrojadas por el programa Maxsurf.

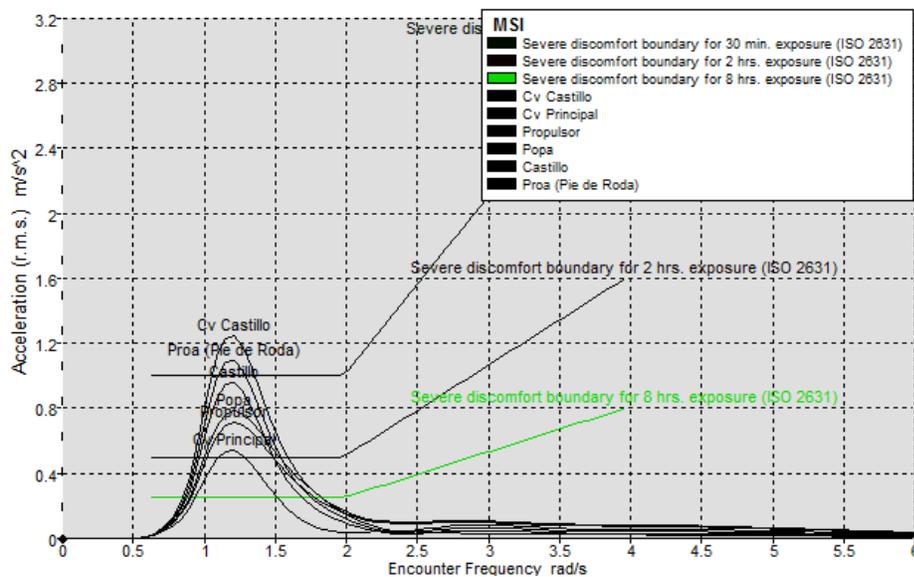


Figura 9. Gráfica del MSI. (PSV)

❖ MIIS

“Interrupciones inducidas de movimiento (MIIS) representan el número de eventos de pérdida de equilibrio que se producen durante una operación arbitraria sobre cubierta” (Graham, 1990). Se demostró que la incidencia de MIIS podría estar relacionada con un concepto de estimador de fuerza lateral (LFE), que es una combinación de la aceleración lateral con referencia en la tierra y aceleración lateral con referencia al buque debido al movimiento de roll.

La principal fuente de criterios sobre incidencia al mareo es la Norma Internacional ISO 2631, la cual cubre vibraciones verticales en el rango de frecuencias desde 0,1 hasta 0,80 Hz y vincula los factores de aceleración vertical, tiempo de exposición y la frecuencia, y ofrece límites de molestias severas en términos de los RMS y aceleración vertical para diferentes tiempos de exposición, como se muestra en la Fig. 10.

Dependiendo del tiempo de exposición y la frecuencia de oscilación hay diferentes valores de aceleración vertical RMS que podrían ser seleccionados como criterio de comportamiento en el mar. Esto daría lugar a diferentes niveles de habitabilidad para las mismas condiciones del mar.

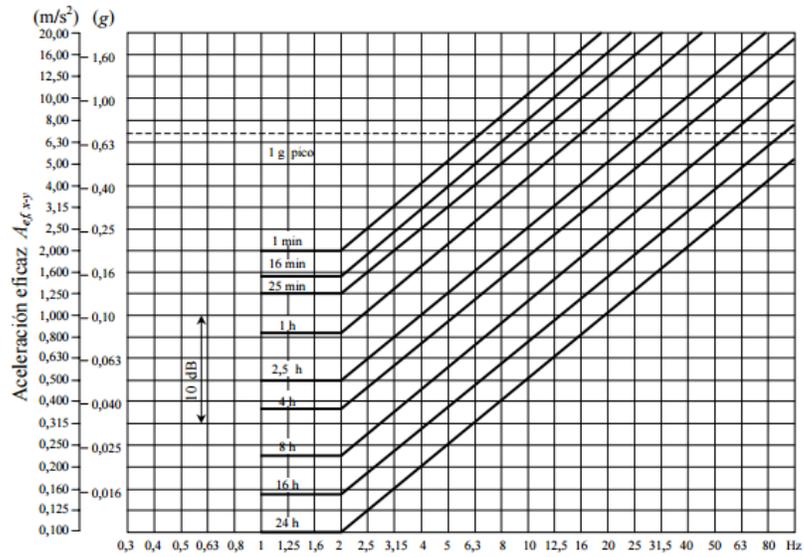


Figura 10. ISO 2631. Límites de malestar Severo. (Miyara, 2005)

IV. Emersión de la hélice del propulsor

Este evento tiene como objetivo identificar la probabilidad de emersión del propulsor y que debe estar limitada al 5% de ocurrencia. Un gran riesgo para la embarcación ocurre cuando esta se encuentra en condiciones severas de mar y el propulsor emerge, esto hace que el motor tenga una sobrecarga en sus cojinetes y engranajes de acoplamiento. La Ecuación 17 muestra la forma de cómo se puede hallar la probabilidad para las distintas condiciones de mar que se está realizando la investigación, esta ecuación depende de la profundidad del propulsor y la variación del movimiento vertical relativo.

$$P_{PE} = \exp \left[-\frac{h^2}{2m_{0rvm}} \right]$$

Ecuación 17. Probabilidad de la Emersión del Propulsor

Donde:

h = profundidad en la parte superior del propulsor

m_{0rvm} = variación del movimiento vertical relativo del espectro de popa.

6 Modelo de Análisis

Este capítulo describe el modelo de análisis utilizado para desarrollar el proceso de investigación y llegar a conclusiones claras acerca de lo que se debe hacer y que no con respecto al diseño de la embarcación. Para tal fin se desarrolló una herramienta de cálculo en Excel la cual llamaremos Navío 1 y una geometría en la herramienta computacional Maxsurf más específicamente en el módulo Modeler.

Consiste inicialmente en trabajar con el programa Maxsurf, el cual necesita la geometría del casco con que se orientara la investigación, las masas y radios de giro, las localizaciones o coordenadas de análisis que se necesitan para iniciar el proceso, el espectro de mar el cual corresponde a las especificaciones de la región de análisis donde se pretende que navegue la embarcación, las velocidades de trabajo de la embarcación y ángulos de incidencias de la ola, con estos datos en el programa se corre la información todo con el fin de obtener una serie de datos que luego serán pasados a navío 1, todo con el fin de verificar las probabilidades de cada uno de los eventos anteriormente explicados en el capítulo 5.

El proceso en navío 1 es el siguiente: existen 4 plantillas en Excel donde se realizan los cálculos analíticos, la primera es la del embarque de agua para la cual se necesita el movimiento vertical relativo para cada uno de los ángulos de incidencias y velocidades de análisis, el puntal, el calado y la altura de francobordo efectiva, este evento no debe sobre

pasar el 5%, al obtener los resultados si se sobrepasa el limite debe verificarse la geometría nuevamente en el programa de Maxsurf, el anexo 1 muestra la hoja de cálculo y la formulación que se hizo necesaria para este análisis.

Para el impacto hidrodinámico se necesitan tres datos para la segunda hoja como se muestra en el anexo 2, los cuales son el movimiento vertical relativo, la velocidad crítica y el calado de la sección media de la embarcación de análisis, este evento no debe exceder el 1% si sobre pasa el límite se debe verificar el casco en la herramienta de Maxsurf.

En el caso de las aceleraciones solo se necesita las aceleraciones verticales relativas para cada uno de los ángulos de incidencias y velocidades de análisis, este criterio no debe ser mayor 0,5g, si se sobre pasa el límite debe ser verificada la embarcación en la herramienta computacional.

El evento de la emersión del propulsor necesita dos datos los cuales son el movimiento vertical relativo y la distancia del propulsor a la línea de agua, este criterio no debe ser mayor al 5% y si sobrepasa este límite debe verificarse en Maxsurf la geometría del casco.

Cuando los datos obtenidos para cada uno de los ángulos de incidencias y velocidades de análisis son aceptables debido a que no sobrepasa el límite que exige cada evento se

verifica que el casco es el más óptimo y el diseño del casco con que inicialmente se hicieron los cálculos es el indicado y se finaliza el proceso.

La figura 11 muestra gráficamente el proceso que se lleva para el análisis del comportamiento en el mar para una PSV.

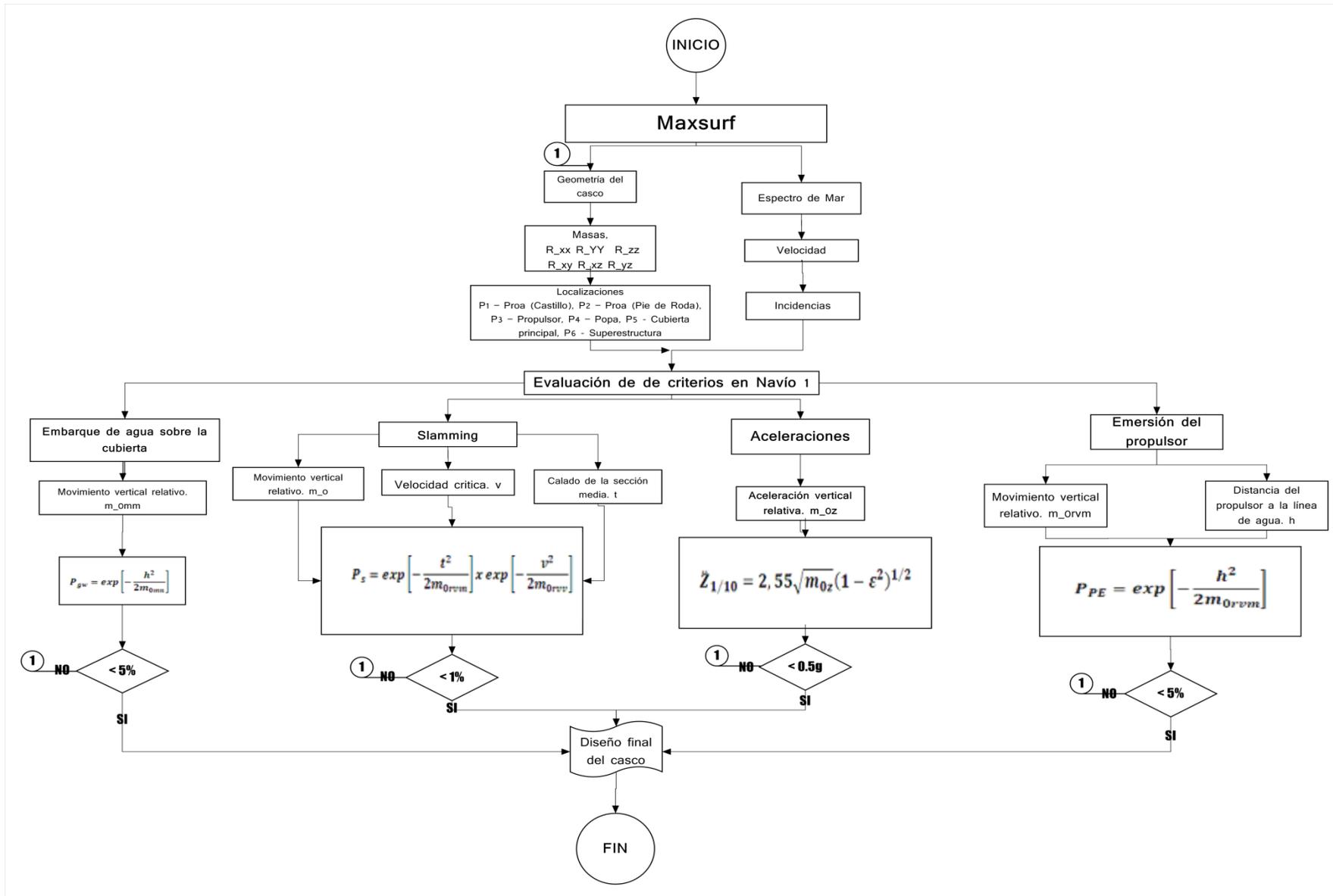


Figura 11. Modelo de análisis

7 Condición Ambiental

7.1 El mar Caribe y sus condiciones ambientales

“Al norte de Colombia, entre el Golfo de Urabá y la Serranía de Perijá se extiende una llanura cálida, húmeda en su extremo occidental y muy seco en su porción oriental. Al norte limita con el mar Caribe. Del sur recibe los ríos Atrato, Sinú y Magdalena, que vienen de los valles interandinos y se demoran en sabanas y ciénagas antes de ir al mar. También, los ríos Aracataca, Ranchería y Don Diego, que bajan de la Sierra Nevada de Santa Marta”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

“Interrumpiendo la llanura del Caribe en su porción central, prácticamente desde la línea costera, se levanta la Sierra Nevada de Santa Marta, un impresionante macizo montañoso que alcanza casi 6.000 metros de altura. En el extremo noreste, en la Alta Guajira, se alzan una serie de serranías menores: La Tata, Jarara y Macuira. Las cordilleras andinas se proyectan también sobre las tierras bajas del Caribe colombiano, formando serranías bajas, como Avive, San Jerónimo, Ayapel, San Lucas, Perijá y los montes de Oca. Además, se encuentran algunas colinas de rocas ricas en carbonato de calcio, que se formaron bajo el mar y emergieron en épocas recientes, como la Serranía de San Jacinto y el Cerro de la Popa”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

“Dos de las estrellas hidrográficas más importantes del país pertenecen a la vertiente del Caribe: la Sierra Nevada de Santa Marta y el Macizo de Paramillo. En la frontera con Panamá, la Serranía del Darién forma un arco cubierto por espesas selvas; es la porción más húmeda del Caribe”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

“La costa colombiana sobre el Caribe recibe la influencia de los vientos alisios del noreste, que los navegantes llamaron vientos del comercio, pues al formarse en las zonas de alta presión atmosférica del Océano Atlántico y soplar hacia el trópico desviados arrastraban las embarcaciones de vela desde Europa hasta las Américas. Estos vientos, a su paso por el Caribe, se cargan con la humedad proveniente de la evaporación del agua marina. Cuando llegan a la llanura costera, encuentran un frente de baja presión atmosférica, es decir aire caliente que asciende, y siguen tierra adentro, saturado de vapor de agua”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

“Las condiciones oceanográficas del Caribe no son menos diversas que sus ambientes terrestres. Toda la franja costera está influenciada por el desplazamiento estacional de la zona donde convergen los vientos alisios de ambos hemisferios. Cuando ocurre el desplazamiento de la zona de convergencia hacia el sur, los vientos del noreste son intensos y persistentes y la corriente costera del Caribe lleva aguas superficiales en dirección suroeste. Cuando la zona de convergencia se desplaza hacia el norte, los vientos son débiles y de orientación variable. Entonces, se forma la contracorriente Panamá - Colombia y la

franja costera recibe aguas provenientes de la porción suroeste del Caribe”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

“En costas de la Guajira y del Magdalena, a unos 180 Km. mar afuera, hay una zona de surgencias, es decir, un afloramiento de agua fría del fondo (150-200 m de profundidad), en la zona de convergencia de la corriente costera del Caribe y la contracorriente de Panamá. Estas aguas, que al parecer provienen de mares subtropicales y templados, y que viajan lentamente en las capas profundas del mar Caribe, llevan hasta cerca de la superficie una gran cantidad de nutrientes de los fondos marinos”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

“Allí, en la zona fotónica (iluminada por la luz solar), son aprovechados por las algas planctónicas, y éstas, a su vez, sustentan una compleja cadena trófica. Algunas de estas algas pertenecen a géneros y especies característicos de mares templados y subtropicales, y constituyen por tanto una evidencia de la procedencia de las aguas del Caribe”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

“El aporte constante de agua proveniente de ríos tan caudalosos como el Atrato, el Sinú y el Magdalena, también contribuye a la diversificación de ambientes del mar Caribe, pues aportan un importante caudal de nutrientes que subsidia parte de la productividad marina”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

“El área insular del Caribe colombiano no recibe influencia continental y carece de sugerencias importantes. La productividad de sus aguas es subsidiada por los arrecifes coralinos, como en las islas de San Andrés y Providencia. La región suroeste del archipiélago de las islas del Rosario, recibe, estacionalmente, la influencia de aguas continentales que provienen del canal del Dique. También, el lado sur de las islas de San Bernardo”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

“En mar abierto, la productividad depende de cadenas tróficas de aguas profundas, que se fundamentan en la descomposición de la materia orgánica que se precipita a los fondos marinos”. (Tovar J. , Offshore PSV Caribe, 2014)

7.2 Espectro de Oleaje del Caribe Colombiano

“Utilizando información de dos boyas de oleaje direccional instaladas en el Caribe en el área de Barranquilla y la isla de Providencia en Colombia, se estudió el comportamiento del espectro de frecuencias de oleaje entre marzo de 2006 y agosto de 2007. De manera iterativa se buscaron los valores de las constantes del espectro JONSWAP que mejor reprodujera los espectros mensuales promediados, al encontrar la menor diferencia de los mínimos cuadrados entre los dos espectros. Se encontró que en todas las ocasiones, el oleaje local y el mar de fondo tienen periodos que fácilmente se diferencian. Así mismo el mar de fondo es un evento inusual en el Caribe.” (Ricardo & Serguei, 2007)

Dentro de los resultados obtenidos para el espectro de oleaje, se reportaron los siguientes datos:

Se encontró que para todos los meses en las dos boyas, el comportamiento del oleaje producido por vientos locales, tiene periodos inferiores a los 12 segundos. Igualmente se evidenció que el mar de fondo es un fenómeno poco usual para el Caribe.

“Los datos evaluados de la boya de Barranquilla y Providencia, evidencian apreciables variaciones espaciales en el comportamiento promedio del oleaje, teniendo para Barranquilla valores de *H_{m0}* promedio de 2.11m para el mes de julio/07 y de 1.55 m para el mismo mes en la boya de Providencia”. (Ricardo & Serguei, 2007)

De acuerdo al CIOH (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe), se hace referencia a cuatro áreas en el mar Caribe conteniendo información meteoceanográfica y climatológica a la comunidad naviera y de manera a definir pronósticos, son estas: área noroeste, suroeste, noreste y sureste.

El área actual con mayor potencial para exploración para la región caribe es el suroeste, y que corresponde a las condiciones de vientos y olas más severas entre las otras áreas de este sector. En dicha área la altura de oleaje representa entre 2 y 2.7 m de acuerdo con la referencia del boletín de pronósticos extendidos del CIOH, el viento era de dirección

noreste y velocidad de 23 a 25 nudos, la época del año en que se escoge como ejemplo de aplicación es la del mes de enero y que representa dentro del año una condición extrema para dicha región.

Para el caso de condiciones extremas en el caribe se tendrán en cuenta los datos obtenidos durante el huracán Emily en el año 2005, ya que se presentaron olas mayores a 7 metros de altura con periodos de 16 segundos, longitudes de ondas de 400 metros, velocidad de fase 25.18 metros por segundos (48.94 nudos) y velocidades de grupo cercanas a los 13 metros por segundo (25.26 nudos). La dirección predominante de propagación del oleaje en esta parte del caribe es norte, oscilando entre NW y NE (330°-030). (Gutierrez & Serguei, 2005)

Teniendo en cuenta las características anteriores del oleaje para la región del caribe y el bloque exploratorio de interés, Bloque Tayrona, se seleccionaran dos condiciones de análisis, una para condiciones normales donde la altura significativa del oleaje estará entre 2 y 2,7 m y una segunda para condiciones extremas que será de 7 m de altura, caso extremo que representaría un huracán.

Se seleccionó el bloque Tayrona porque desde el 2004 es en esta zona donde se encuentra el principal contrato de exploración y perforación costa fuera en el caribe colombiano

otorgado por la agencia nacional de hidrocarburos tal como lo confirmo la empresa Ecopetrol (Ecopetrol, 2014).

El espectro seleccionado es el JONSWAP ajustado a estas condiciones de mar. Condiciones representadas en la Tabla 3 y la figura 12 muestra la situación geográfica del Bloque Tayrona Occidental.

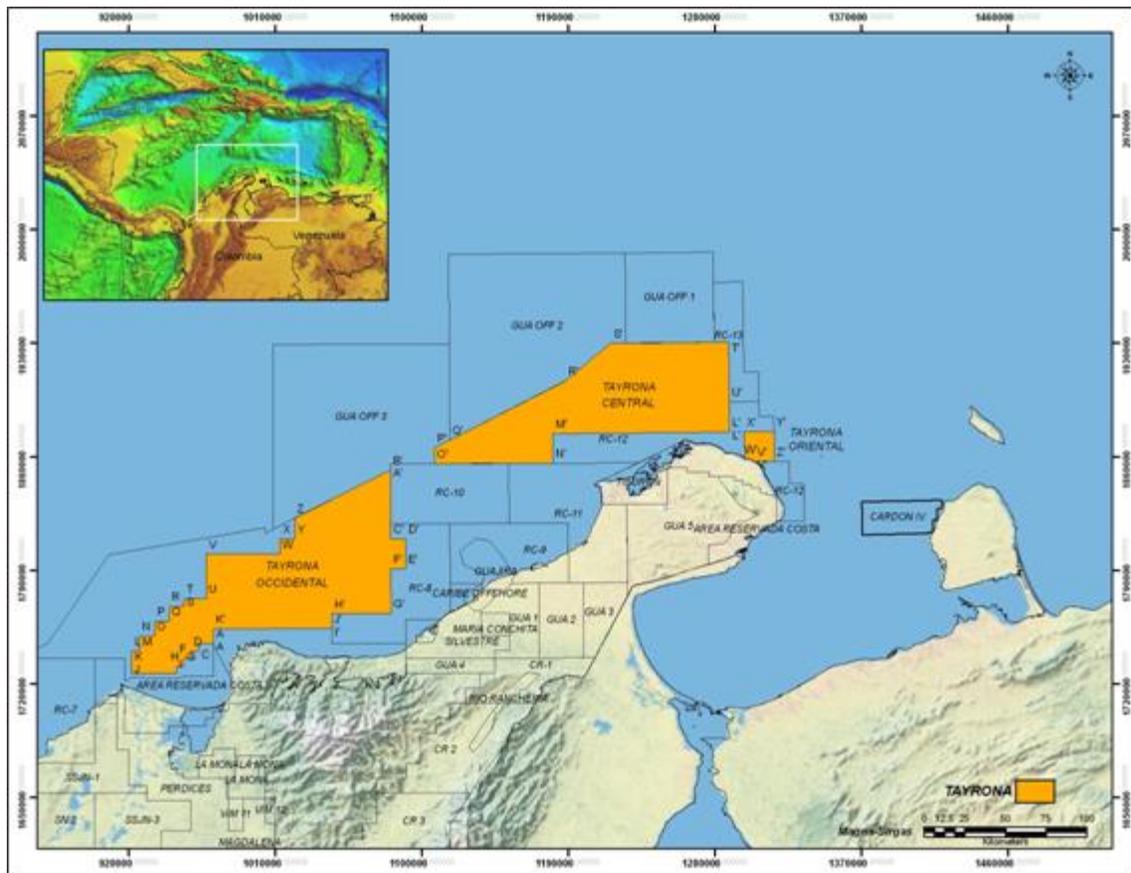


Figura 12. Situación Geográfica Bloque Tayrona Occidental.

Condiciones	Hs (mts)	Tp (seg)	Vientos (nudos)	Orientación	Espectro
Condición normal	2 -2,7	8,5	23-25	NE	JONSWAP
Condición extrema	7	16	48,94	NW-NE	JONSWAP

Tabla 3. Condiciones ambientales del Bloque Tayrona

8. Caso Estudio: Bloque Tayrona Occidental

Debido al desarrollo que se está dando en el país con respecto a la industria petrolera, y la inminente inversión de las grandes empresas de hidrocarburos y las perforaciones de los yacimientos ubicados en alta mar de la zona caribe, Bloque Tayrona occidental, se decide orientar este análisis en el diseño de una embarcación de apoyo logístico a operaciones offshore (PSV).

La figura 13 muestra la geometría, y las dimensiones básicas son presentadas en la tabla 4 seguidamente. A esta embarcación se le realizarán los análisis de comportamiento en el mar caribe de acuerdo a las condiciones ambientales definidas.



Figura 13. Embarcación PSV de estudio

Nombre	Dimensiones (m)
<i>Eslora, LBP</i>	59,7
<i>Manga, BOA</i>	12,7
<i>Calado</i>	3,86
<i>Puntal</i>	5,551

Tabla 4. Dimensiones principales de la embarcación

En la figura 14 se muestra RAO para heave y pitch para una velocidad de 12 nudos y con un ángulo de encuentro de las olas de 180°.

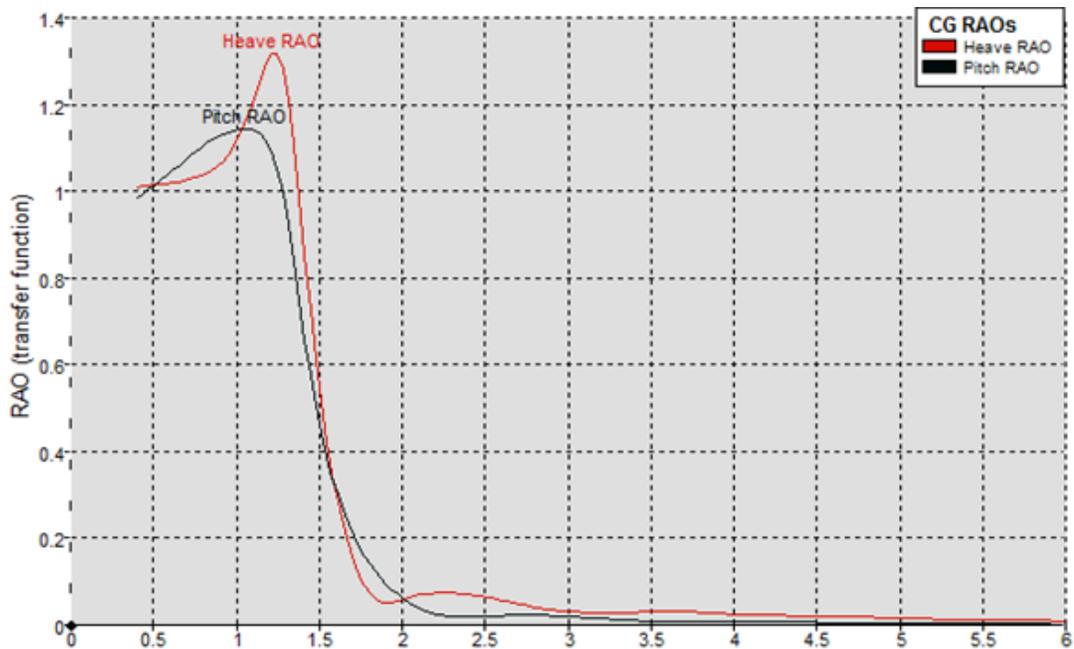


Figura 14. RAO (Vel. 12 nudos – 180°).

Fueron analizadas las velocidades desde 0, 10 hasta las velocidades de servicio 12 nudos. Se detallan a continuación los resultados de las verificaciones de los eventos para 0, 10 y 12 nudos e incidencias de 0 ° a 180 con un incremento de 15°.

9. Resultados

Este capítulo es el resultado de cada una de las evaluaciones realizadas en los puntos estratégicos de la embarcación presentada durante esta investigación; cada tabla y grafico es la descripción analítica del comportamiento de cada uno de los eventos descritos en la sección 4.2.7 “Criterios de Seakeeping”, en los puntos de interés.

Cada evento se describe inicialmente a través de una tabla que muestra los valores correspondientes a cada punto de la embarcación que sea necesario, estos están regidos bajo criterios estadísticos, los cuales no deben ser sobre pasado; los valores en rojo representan que el límite de ese evento en específico ha sido sobrepasado

Por su parte las imágenes bajo de las tablas de resultados son solo una representación gráfica de los valores numéricos en cada punto de interés y evento trabajado.

Cada evento debe ser cumplido en los puntos de interés, en el caso de que esto no suceda se deberán hacer recomendaciones y modificaciones en el diseño del casco y distribuciones internas de masas para la embarcación que se está analizando.

Las imágenes y las tablas corresponden a una condición ambiental específica mostrada anteriormente en la tabla 3, del capítulo 7 “condición ambiental” y sección 7.2, a una velocidad y un ángulo de incidencia, descrito en el capítulo 8 “caso estudio” respectivamente.

9.1 Tablas de Resultados

9.1.1 Evaluación de las Aceleraciones

Aceleraciones															
Localización	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Criterio < 0,5g	
P1 proa (castillo)	0.99	1.01	1.06	1.15	1.17	1.38	1.30	1.15	1.04	1.06	1.16	1.21	1.22	4.905 <i>m/seg²</i>	
P2. Proa (Pie de roda)	0.85	0.90	0.98	1.02	1.12	1.34	1.24	1.12	1.01	0.94	0.97	1.02	1.05		
P3. Propulsor	1.33	1.34	1.34	1.33	1.27	1.15	1.05	1.06	0.97	0.83	0.68	0.58	0.57		
P6. Castillo	0.90	0.91	0.92	0.98	1.12	1.28	1.20	1.08	0.98	0.87	0.83	0.84	0.87		

Tabla 5. Resultado de las aceleraciones en la condición normal a velocidad 0 nudos.

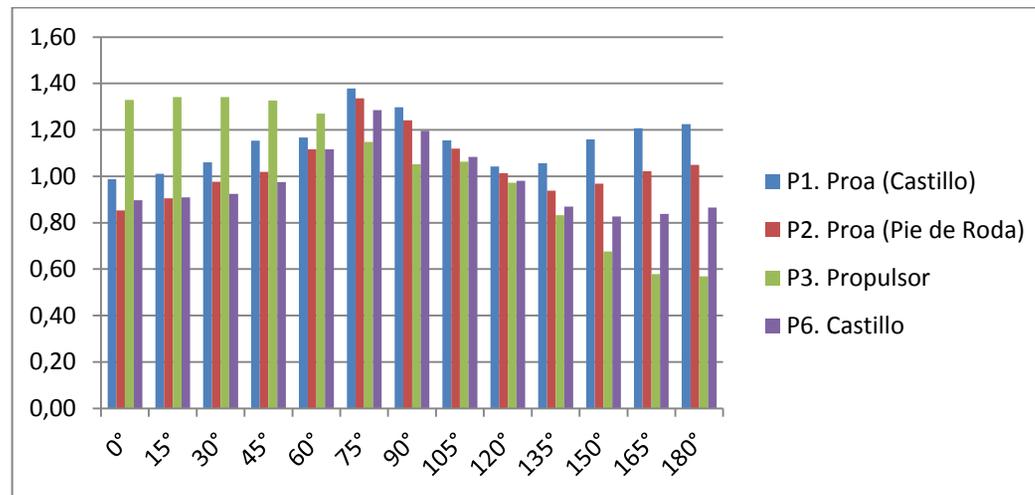


Figura 15. Representación gráfica de las aceleraciones (condición normal, velocidad 0)

Localización	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Criterio < 0,5g
P1 proa (castillo)	0.99	1.02	1.09	1.18	1.19	1.39	1.25	1.07	0.99	1.06	1.19	1.25	1.27	4.905 m/seg²
P2. Proa (Pie de roda)	0.82	0.88	0.96	1.01	1.11	1.32	1.17	1.02	0.93	0.89	0.95	1.02	1.05	
P3. Propulsor	1.42	1.43	1.42	1.38	1.29	1.10	0.96	0.97	0.87	0.71	0.54	0.44	0.44	
P6. Castillo	0.84	0.87	0.89	0.94	1.09	1.25	1.12	0.97	0.87	0.77	0.74	0.77	0.81	

Tabla 6. Resultados de las aceleraciones en la condición extrema a velocidad 0 nudos.

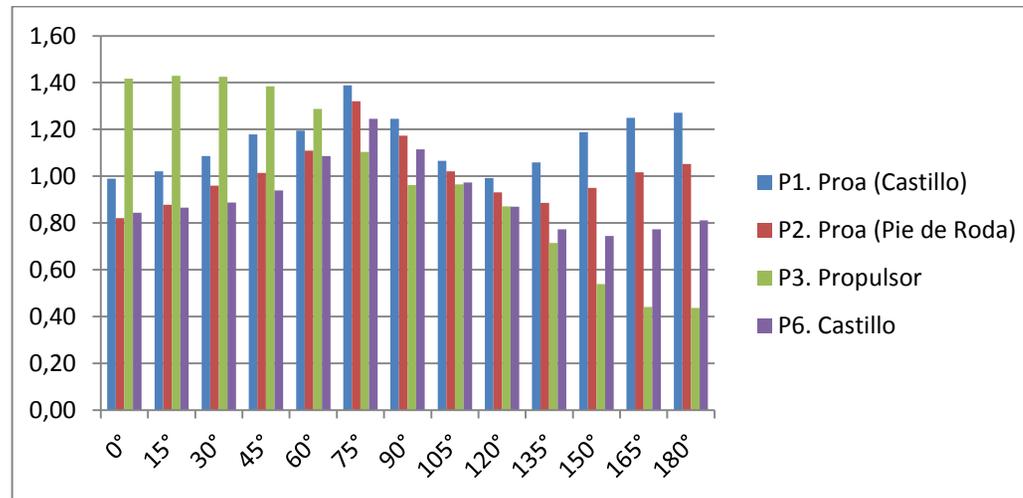


Figura 16. Representación gráfica de las aceleraciones (condición extrema, velocidad 0)

Aceleraciones														
Localización	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Criterio < 0,5g
P1 proa (castillo)	0.44	0.40	0.31	0.28	0.45	0.76	1.19	1.65	1.99	2.48	2.94	3.21	3.31	4.905 m/seg²
P2. Proa (Pie de roda)	0.43	0.38	0.28	0.24	0.39	0.71	1.13	1.60	1.94	2.34	2.73	3.00	3.12	
P3. Propulsor	0.46	0.42	0.33	0.32	0.45	0.71	1.18	1.72	2.04	1.91	2.24	2.23	2.24	
P6. Castillo	0.43	0.38	0.27	0.22	0.35	0.67	1.08	1.57	1.91	2.24	2.56	2.79	2.91	

Tabla 7. Probabilidad de las aceleraciones en la condición normal a velocidad de 10 nudos.

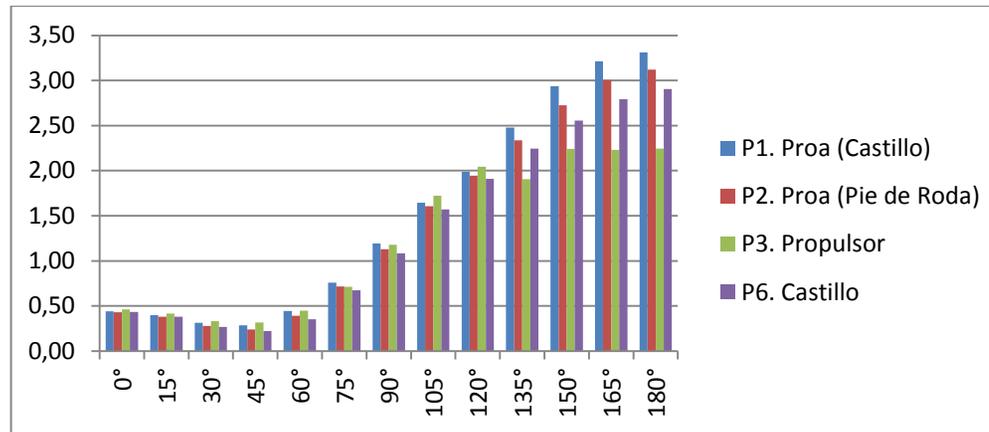


Figura 17. Representación gráfica de las aceleraciones (condición normal, velocidad 10)

Localización	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Criterio < 0,5g
P1 proa (castillo)	0.23	0.23	0.26	0.33	0.52	0.84	1.14	1.36	1.73	2.38	2.98	3.33	3.46	4.905 m/seg²
P2. Proa (Pie de roda)	0.16	0.16	0.19	0.27	0.45	0.78	1.05	1.30	1.64	2.15	2.68	3.05	3.20	
P3. Propulsor	0.23	0.24	0.28	0.36	0.51	0.75	1.11	1.48	1.75	1.91	1.97	2.02	2.07	
P6. Castillo	0.11	0.12	0.16	0.25	0.41	0.72	0.99	1.25	1.91	2.00	2.44	2.76	2.92	

Tabla 8. Resultados de las aceleraciones en la condición extrema a velocidad de 10 nudos.

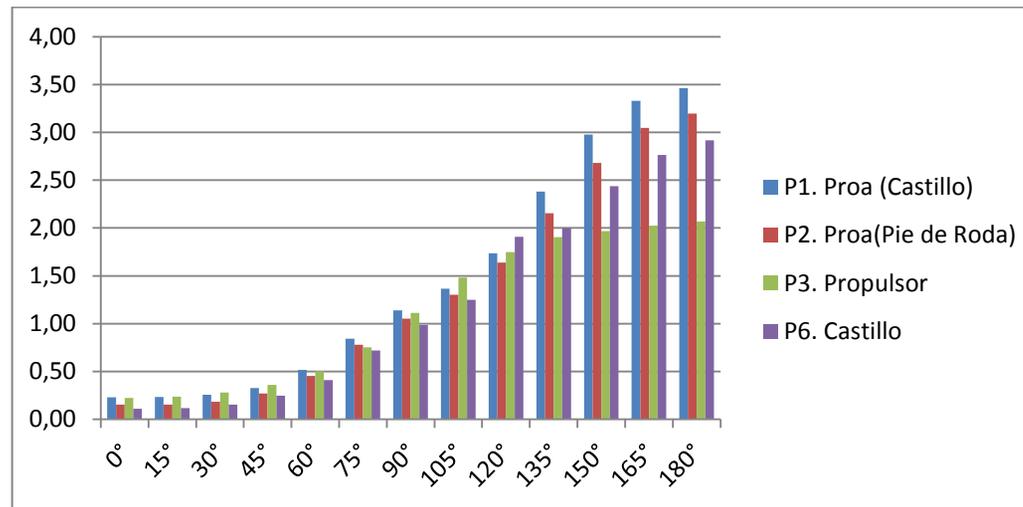


Figura 18. Representación gráfica de las aceleraciones (condición extrema, velocidad 10)

Aceleraciones														
Localización	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Criterio < 0,5g
P1 proa (castillo)	0.61	0.58	0.50	0.30	0.37	0.70	1.18	1.74	2.16	2.73	3.26	3.59	3.70	4.905 m/seg²
P2. Proa (Pie de roda)	0.12	0.59	0.51	0.27	0.33	0.65	1.12	1.70	2.11	2.58	3.03	3.36	3.49	
P3. Propulsor	0.63	0.61	0.53	0.32	0.36	0.64	1.19	1.82	2.22	2.45	2.50	2.52	2.53	
P6. Castillo	0.62	0.60	0.52	0.27	0.31	0.61	1.07	1.66	2.07	2.48	2.85	3.14	3.26	

Tabla 9. Resultados de las aceleraciones en la condición normal a velocidad de 12 nudos.

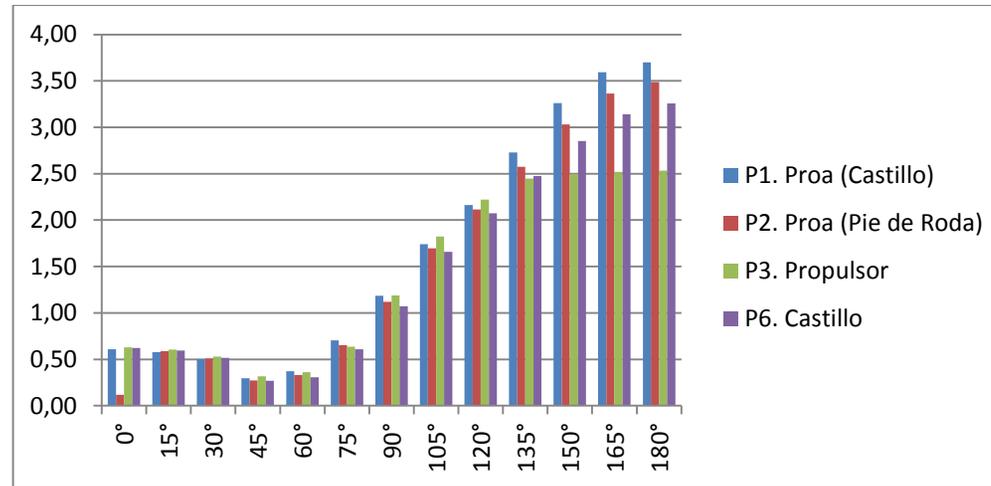


Figura 19. Representación gráfica de las aceleraciones (condición normal, velocidad 12)

Localización	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Criterio < 0,5g
P1 proa (castillo)	0.17	0.17	0.19	0.25	0.44	0.79	1.13	1.45	1.93	2.70	3.40	3.82	3.98	4.905 m/seg²
P2. Proa (Pie de roda)	0.12	0.12	0.22	0.22	0.39	0.73	1.04	1.38	1.83	2.47	3.10	3.54	3.72	
P3. Propulsor	0.16	0.17	0.20	0.28	0.41	0.68	1.13	1.58	1.94	2.21	2.37	2.50	2.57	
P6. Castillo	0.10	0.10	0.12	0.20	0.36	0.66	0.97	1.32	1.76	2.31	2.86	3.26	3.43	

Tabla 10. Resultados de las aceleraciones en la condición extrema a velocidad de 12 nudos.

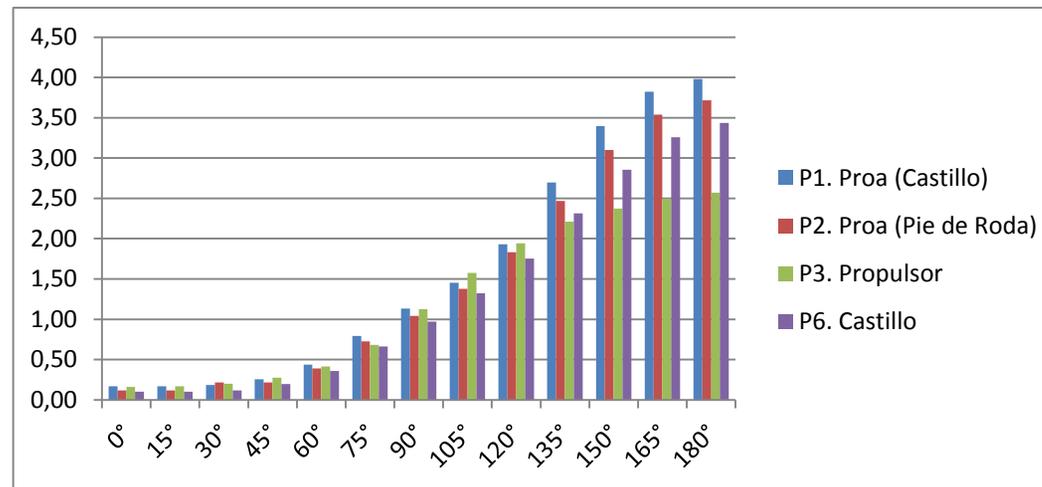


Figura 20. Representación gráfica de las aceleraciones (condición extrema, velocidad 12)

10.2 Embarque de Agua en la Cubierta

Probabilidad														
Localizaciones	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite 5%
P1. Proa (Castillo)	0,11	0,11	0,12	0,13	0,15	0,18	0,08	0,00	0,00	0,04	0,13	0,20	0,23	
P5. cubierta Principal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
P4. Popa	0,47	0,47	0,45	0,40	0,30	0,14	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tabla 11. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición normal a velocidad de 0 nudos.

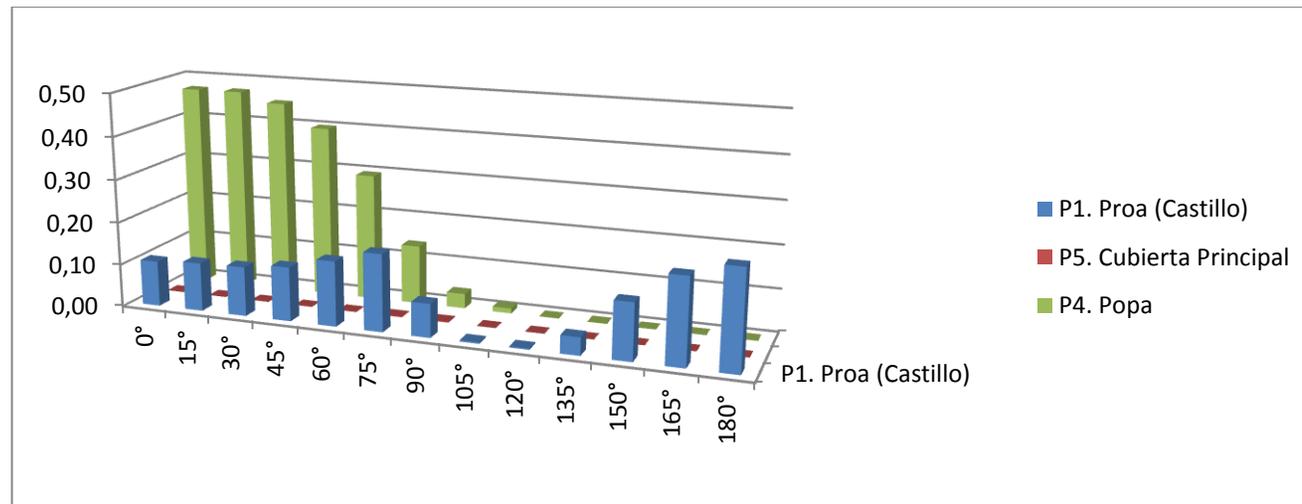


Figura 21. Representación gráfica del embarque de agua sobre cubierta (condición normal, velocidad 0)

Localizaciones	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite 5%
P1. Proa (Castillo)	0,29	0,29	0,29	0,30	0,33	0,34	0,20	0,02	0,01	0,08	0,23	0,34	0,38	
P5. cubierta Principal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
P4. Popa	0,66	0,65	0,63	0,58	0,48	0,30	0,05	0,05	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	

Tabla 12. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición extrema a velocidad de 0 nudos.

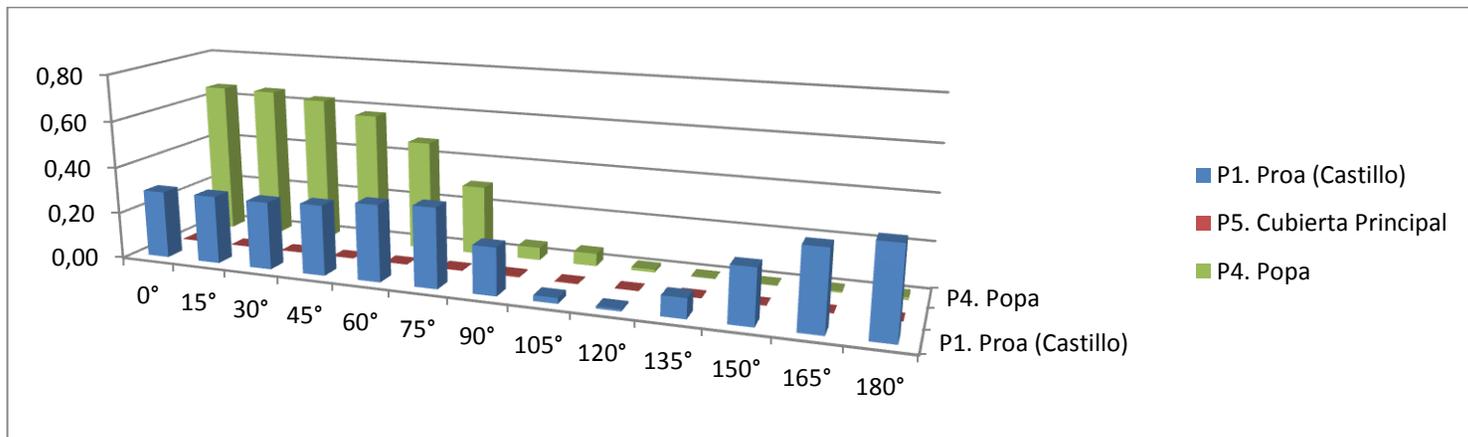


Figura 22. Representación gráfica del embarque de agua sobre cubierta (condición extrema, velocidad 0)

Probabilidad														
Localizaciones	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite 5%
P1. Proa (Castillo)	0,10	0,08	0,05	0,04	0,10	0,19	0,12	0,01	0,02	0,19	0,37	0,46	0,50	
P5. cubierta Principal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
P4. Popa	0,20	0,20	0,19	0,18	0,15	0,11	0,08	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tabla 13. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición normal a velocidad de 10 nudos.

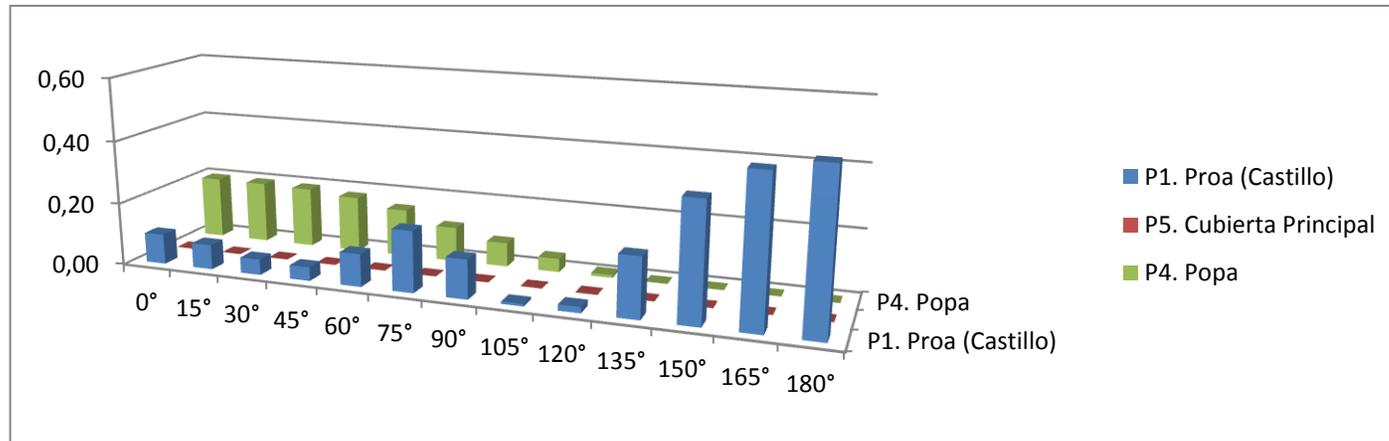


Figura 23. Representación gráfica del embarque de agua sobre cubierta (condición normal, velocidad 10)

Localizaciones	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite 5%
P1. Proa (Castillo)	0,27	0,24	0,20	0,20	0,29	0,38	0,29	0,04	0,05	0,30	0,50	0,60	0,63	
P5. cubierta Principal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
P4. Popa	0,42	0,41	0,39	0,36	0,31	0,24	0,18	0,11	0,04	0,01	0,00	0,00	0,01	

Tabla 14. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición extrema a velocidad de 10 nudos.

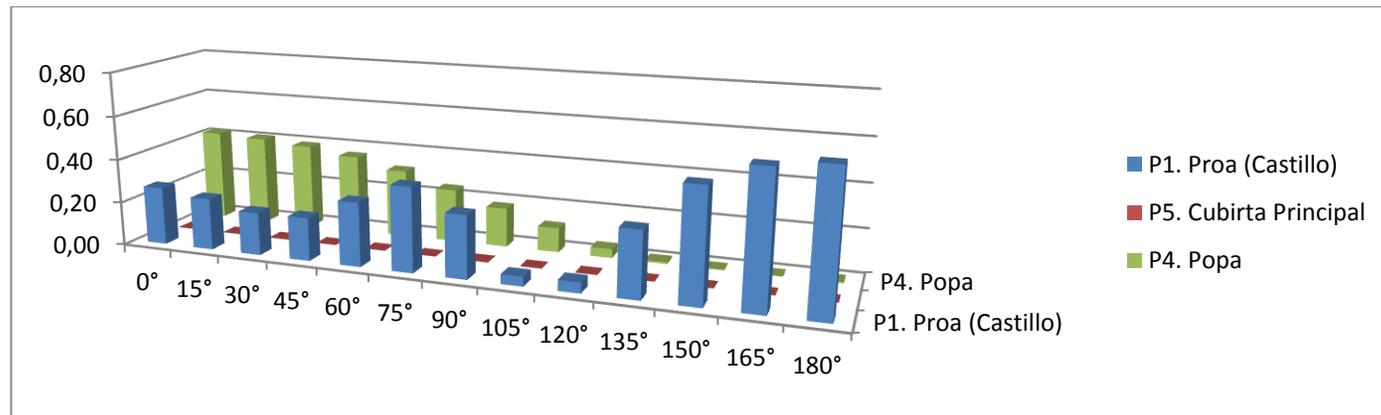


Figura 24. Representación gráfica del embarque de agua sobre cubierta (condición extrema, velocidad 10)

Probabilidad														
Localizaciones	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite 5%
P1. Proa (Castillo)	0,10	0,08	0,05	0,04	0,10	0,20	0,13	0,01	0,03	0,22	0,41	0,50	0,53	
P5. cubierta Principal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
P4. Popa	0,17	0,17	0,17	0,16	0,14	0,10	0,08	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tabla 15. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición normal a velocidad de 12 nudos.

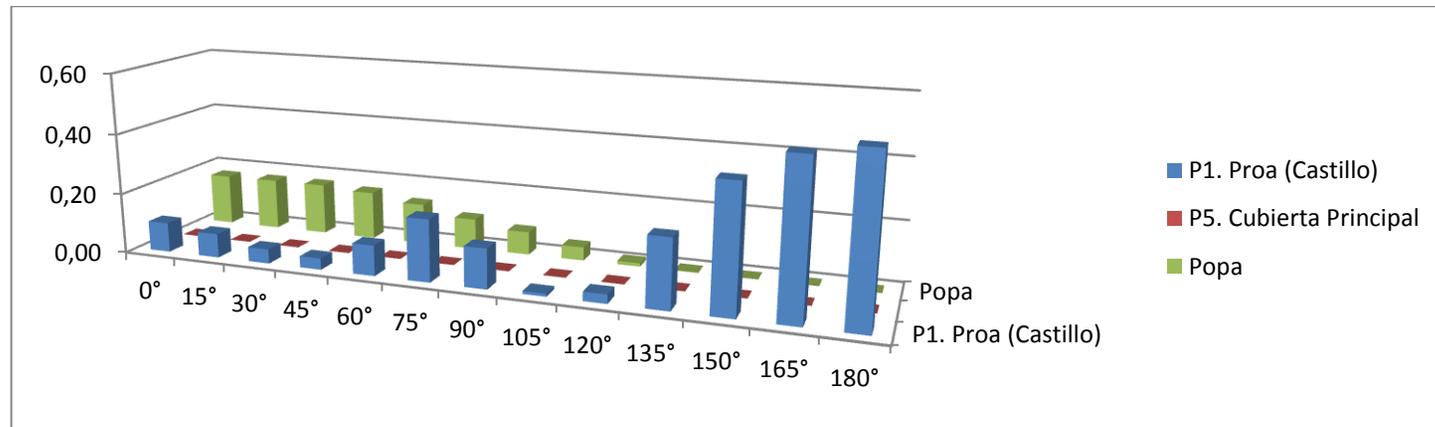


Figura 25. Representación gráfica del embarque de agua sobre cubierta (condición normal, velocidad 12)

Localizaciones	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite 5%
P1. Proa (Castillo)	0,26	0,23	0,19	0,19	0,29	0,39	0,30	0,05	0,07	0,34	0,54	0,63	0,65	
P5. cubierta Principal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	
P4. Popa	0,39	0,38	0,36	0,33	0,29	0,23	0,18	0,11	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	

Tabla 16. Probabilidad del embarque de agua sobre cubierta condición extrema a velocidad de 12 nudos.

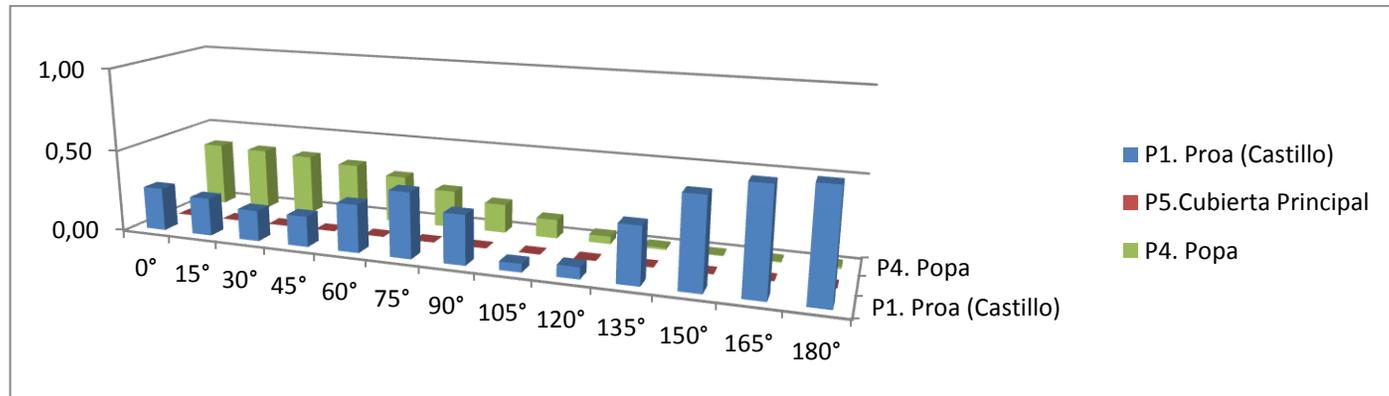


Figura 26. Representación gráfica el embarque de agua sobre cubierta (condición extrema, velocidad 12)

8.3 Emersión del Propulsor

Probabilidad														
Condiciones ambientales	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite 5%
Condición normal	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Condición extrema	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tabla 17. Probabilidad de la emersión del propulsor en condición normal y extrema a velocidad de 0 nudos.

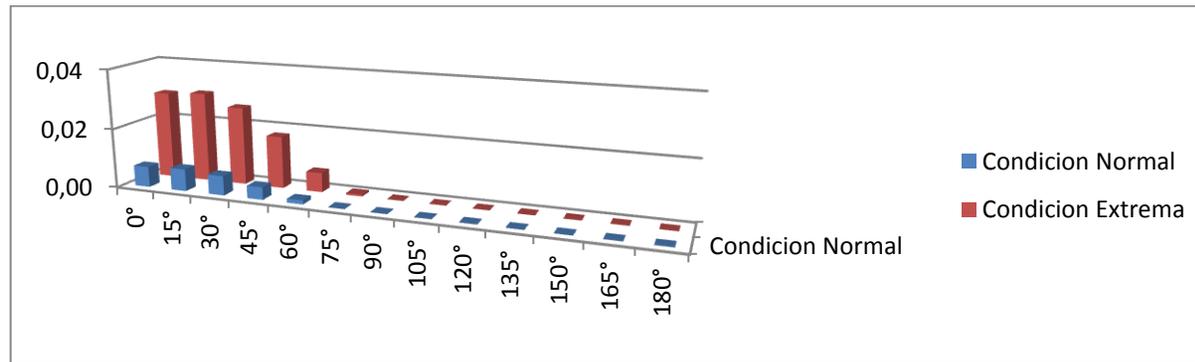


Figura 27. Representación gráfica de la emersión del propulsor (condición normal y extrema, velocidad 0)

Probabilidad														Limite 5%
Condiciones ambientales	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	
Condición normal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000261	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Condición extrema	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tabla 18. Probabilidad de la emersión del propulsor en condición normal y extrema a velocidad de 10 nudos.

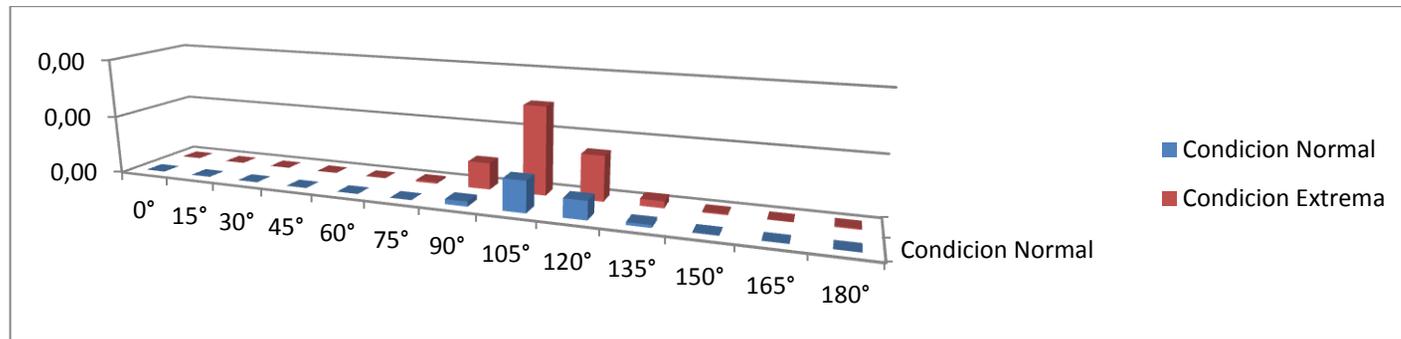


Figura 28. Representación gráfica de la emersión del propulsor (condición normal y extrema, velocidad 10)

Condiciones ambientales	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite 5%
Condición normal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Condición extrema	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tabla 19. Probabilidad de la emersión del propulsor en condición normal y extrema a velocidad de 12 nudos.

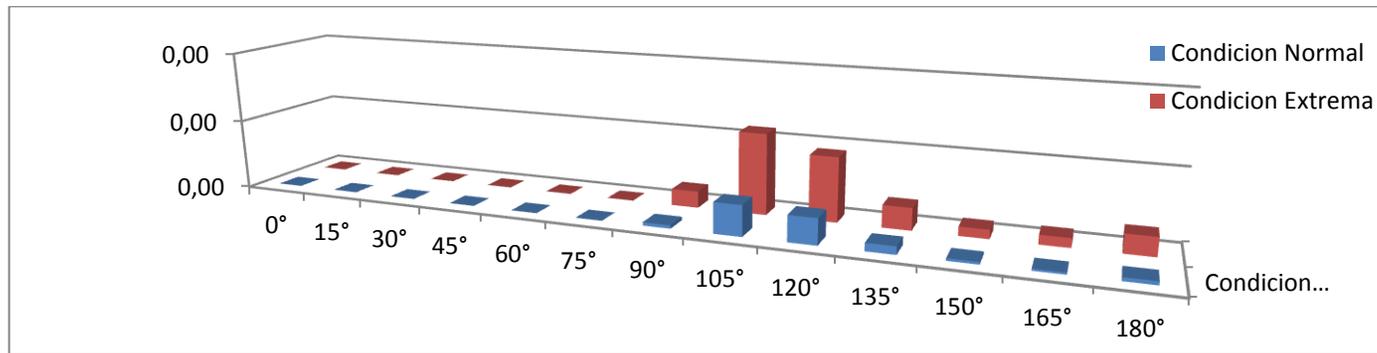


Figura 29. Representación gráfica de la emersión del propulsor (condición normal y extrema, velocidad 12)

8.4 Impacto Hidrodinámico / Slamming

Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite
Proa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1%

Tabla 20. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición normal a velocidad de 0 nudos.

0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1%

Tabla 21. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición extrema a velocidad de 0 nudos.

Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite
Proa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1%

Tabla 22. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición normal a velocidad de 10 nudos.

Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite
Proa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1%

Tabla 23. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición extrema a velocidad de 10 nudos.

Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite
Proa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1%

Tabla 24. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición normal a velocidad de 12 nudos.

15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1%

Tabla 25. Probabilidad impacto hidrodinámico en condición extrema a velocidad de 12 nudos.

De acuerdo con los resultados establecidos, algunos criterios no llegan a ser cumplidos para la embarcación del caso estudio. La figura 30 muestra el criterio RMS para las aceleraciones en la condición ambiental normal, para diferentes ángulos de incidencias de la ola mostrando las respectivas aceleraciones.

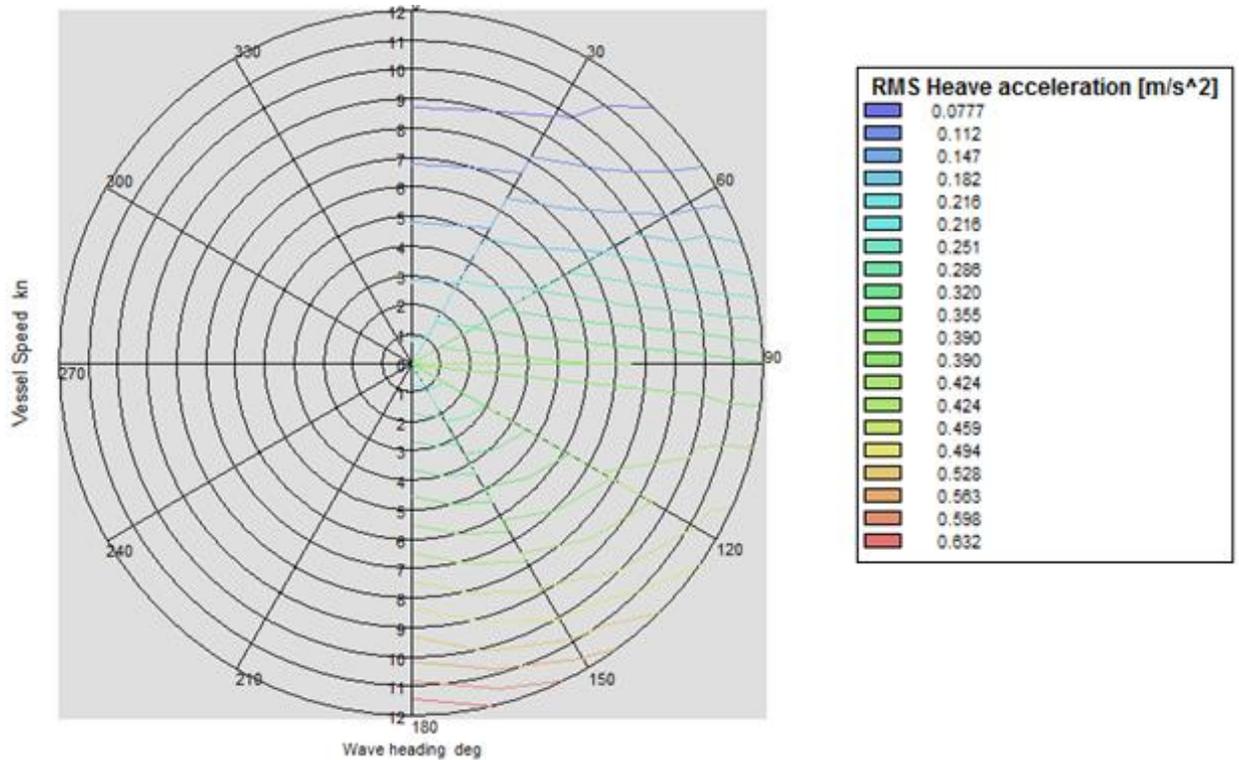


Figura 30. RMS Heave Aceleración condición normal

Lo que describe esta figura es que para diferentes ángulos de incidencia de la ola hay distintas aceleraciones, los colores en la tabla muestran los rangos de aceleraciones de mayor (colores tropicales) a menor (colores cálidos).

Esta figura muestra que para la condición normal con olas de entre 2 y 2,7 metros de altura significativa, y para un ángulo de 180 grados lo que indica es que las mayores aceleraciones están ubicadas en la proa la cual comprende el castillo y el puente de mando, están presentando en este lugar que es donde se encuentran principalmente las personas a bordo.

Estos resultados son coherentes con los presentados en las tablas de las aceleraciones para cada una de las velocidades de operación, sección 9.1. Es importante mencionar que a pesar de que se presentan las mayores aceleraciones en la proa, el criterio no es sobrepasado para ningún punto de análisis.

La figura 31, también describe las aceleraciones que se presentan para cada ángulo de incidencia, velocidades y una condición ambiental extrema, con un comportamiento similar a la condición normal descrita anteriormente.

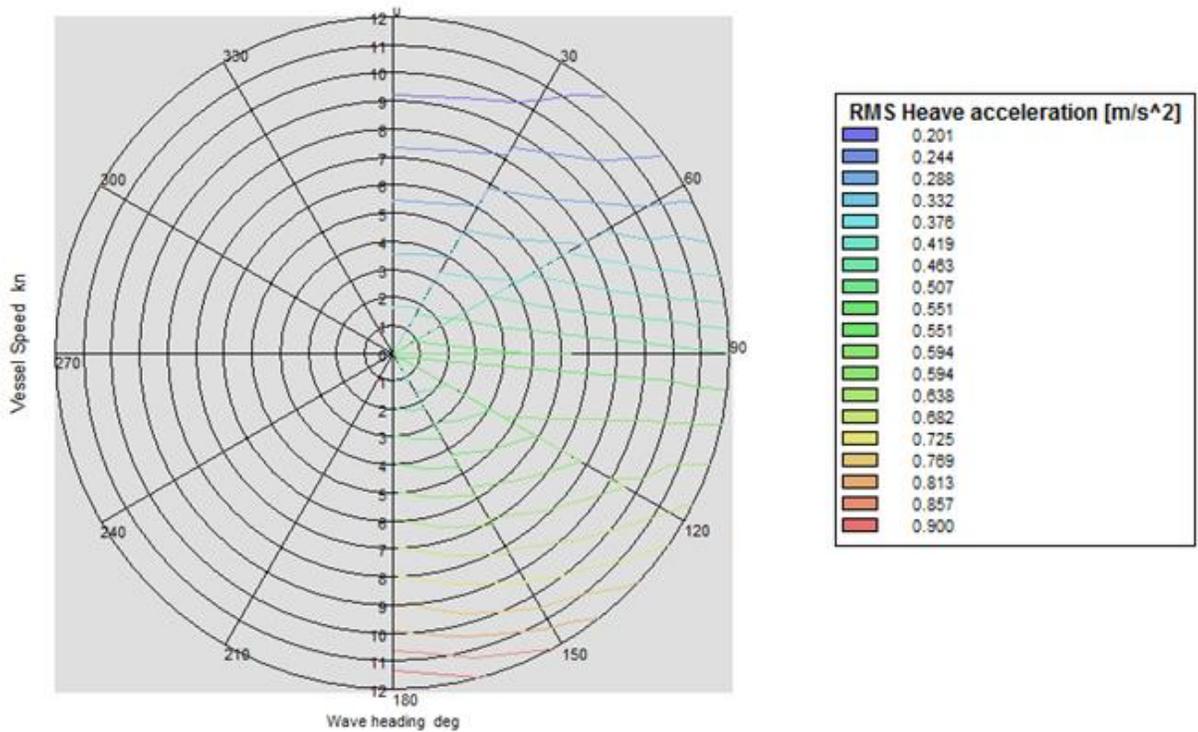


Figura 31. RMS Heave Aceleración, condición extrema

Para el caso del evento de la probabilidad del embarque de agua en la condición normal, el criterio es sobrepasado en gran parte de los ángulos de incidencia, el cual no debe ser mayor a una probabilidad del 5%. Estos ángulos son de 0°, 15°, 60°, 75° y 90°, pero es en la proa de castillo y en la popa donde los resultados sobrepasan el criterio. Los resultados graficados son coherentes conforme lo esperado debido a que donde mayor ingreso de agua se tendrá será en la popa, por su cercanía a la línea de agua.

Para la probabilidad de la emersión del propulsor para cada uno de los ángulos de incidencias y las velocidades de trabajo se mantienen dentro de los niveles límites de 5%.

Por ejemplo, para la condición normal, a una velocidad de 10 nudos y un ángulo de incidencia de 105° , la probabilidad es de 0,0261%;; para la condición extrema, a una velocidad de 0 nudos y un ángulo de incidencia de 180° la probabilidad es de $7,6E-25$.

El impacto hidrodinámico o *Slamming* no presenta excesos en ninguno de los ángulos de incidencias, velocidades de trabajo y condiciones ambientales, este criterio debe ser menor al 1%.

Para realizar mejoras en la embarcación es fundamental tratar de reducir los movimientos y las cargas inducidas por la mar. De esta manera se podrá mantener la velocidad, sea cual sea el estado de la mar, y se garantizará que la embarcación pueda desempeñar los objetivos para los que ha sido creada; la reducción en las cargas permitirá disminuir el peso de acero, y la estructura podrá ser más ligera, lo que disminuirá el costo de la misma.

Conclusiones

El presente estudio define una serie de criterios basados en valores límites y probabilidades, que permiten analizar el comportamiento en el mar de una embarcación tipo PSV para el caribe colombiano.

Cada criterio es evaluado para una embarcación seleccionada como caso estudio, en localizaciones definidas previamente, bloque Tayrona, conforme en la tabla 3, del capítulo 7 “condición ambiental” y sección 7.2. Las evaluaciones fueron realizadas para diferentes ángulos de incidencia, velocidades y condiciones ambientales, establecidas estas últimas como normales y extremas para una región de interés del Mar Caribe Colombiano.

Cabe resaltar que son tres los procedimientos que tradicionalmente se emplean en la hidrodinámica de los buques para averiguar los movimientos y las cargas que las olas inducen sobre ellos: cálculos teóricos, ensayos con modelos geoméricamente semejantes, y pruebas con barcos reales. No cabe duda que el último de los tres, las pruebas con el barco real, es quien da los resultados más fiables, pero una vez estos han sido creados no se pueden hacer modificaciones si los resultados en la prueba no son los más favorables.

Las recomendaciones que se pueden dejar a partir de este estudio es que como la embarcación está presentando demasiado ingreso de agua en la proa lo que se debe es subir

el puntal de la embarcación o la construcción de un apéndice cerca de la línea de agua que permita el desvío de la misma para disminuir la probabilidad del fenómeno.

Para entender mejor el comportamiento del mar caribe colombiano se debe construir una embarcación a escala, y si es posible realizar una pequeña prueba de canal a esta para verificar los datos y dar conclusiones más claras acerca del análisis hidrodinámico en el mar que puede llegar a tener la embarcación.

Las recomendaciones que se pueden realizar serian modificaciones en el diseño del casco y distribuciones internas de masas para esta embarcación tipo PSV, orientadas al cumplimiento de los criterios presentados (sección 5.2.7“Criterios de Seakeeping”) en este estudio, serán objeto de trabajos y propuesta de futuros desarrollos.

Al evaluar el comportamiento hidrodinámico de la embarcación se llega a la conclusión de que los resultados obtenidos son de carácter teórico por lo tanto los resultados obtenidos deben comprobarse con mediciones de campo para validar los procesos de análisis aplicados. Por lo tanto verificar a través de diferentes metodologías de trabajo que los resultados son parecidos con el fin de mostrar que la estrategia de investigación aquí propuesta es una herramienta útil para futuros trabajos en el área naval.

Bibliografía

- ITTC International Towing Tanks Conference . (8 de Julio de 2015). Recuperado el 9 de Julio de 2015, de ITTC International Towing Tanks Conference: itc.sname.org
- CIOH. (25 de Mayo de 2015). Oceanografía Operacional . Recuperado el 17 de Febrero de 2015, de Oceanografía Operacional : <http://www.cioh.org.co/meteorologia/CaribWan2.php>
- Couselo, A. (2015). Analisis del Comportamiento en el Mar de una Embarcacion de Alta velocidad Mediante Teoria de Fajas. Valdivia.
- Ecopetrol. (2 de Diciembre de 2014). Primer hallazgo de hidrocarburos en aguas profundas del Caribe colombiano. Obtenido de Ecopetrol: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines-2014/contenido/Ecopetrol+anuncia+primer+hallazgo+en+aguas+profundas+del+Caribe+colombiano>
- EMAS . (22 de Mayo de 2015). EMAS Marine . Recuperado el 23 de Mayo de 2015, de EMAS Marine : <http://www.emas.com/index.php/our-expertise/emas-marine/our-fleet-2/anchor-handling-tug-supply-vessels/>
- Eriksen, J. (2000). Standardization Agreement STANAG. Copyright North Atlantic Treaty Organization.

Gamarra, H., Yarin, A., Yarin, Y., & Palacios, M. (2011). Comportamiento Dinámico de una Embarcación Pesquera en el Mar Peruano. Lima: TECNIA.

Graham, R. (1990). Motion-Induced Interruptions as Ship Operability Criteria. *Naval Engineers Journal*, 65-71.

Gutierrez, G., & Serguei, L. (Julio de 2005). Academia. edu. Recuperado el 25 de Mayo de 2015, de Academia. edu:
http://www.academia.edu/6129678/An%C3%A1lisis_de_espectro_de_energ%C3%ADa_de_oleaje_bajo_condiciones_atmosf%C3%A9ricas_severas_en_el_Caribe_Colombiano

Martín, R. (2013). upcommons.upc.edu. Recuperado el 15 de octubre de 2014, de upcommons.upc.edu:
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/19741/1/PFC-%20Ra%C3%BA1%20Martin%202013.pdf>.

Mccauley, M. (Mayo de 1974). Researchgate. Recuperado el 5 de Mayo de 2015, de Researchgate:
http://www.researchgate.net/publication/18346380_Motion_sickness_incidence_as_a_function_of_the_frequency_and_acceleration_of_vertical_sinusoidal_motion

Medina, C. (2016). Análisis del Comportamiento en el Mar de la Patrullera de Costa segunda Generación CPV MKII. Cartagena.

Miyara, F. (2005). Fceia. Obtenido de Fceia:

<http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/vibraciones.pdf>

Ochi, M., & Motter, L. (1973). Prediction of Slamming Characteristics and Hull Responses for Ship Design. Technical Resource Library: Transactions TRANS .

Repsol. (s.f.). Repsol. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de Repsol:

https://www.google.com.co/search?q=bloque+tayrona+petrobras&biw=1366&bih=623&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwjc-_3Ph7TKAhWFGB4KHaUzDyUQ_AUIBigB#imgsrc=142K7LZk1yY9IM%3A

Ricardo, T., & Serguei, L. (2007). Estudio del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. Boletín Científico CIOH, 8-18.

Tovar, J. (15 de Septiembre de 2014). Offshore PSV Caribe. Obtenido de Offshore PSV Caribe:

<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnxvZmZzaG9yZXBzdmNhcmlhZXxneDozMzNiODNmNDVIMjIxYjIj>

Tovar, J. (5 de Mayo de 2014). Offshore_PSV_Caribe. Recuperado el 25 de Mayo de 2015, de Offshore_PSV_Caribe:

<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnxvZmZzaG9yZXBzdmNhcmlhZXxneDo2MzNiZWU5YjdiNDc4NzE0>

Tovar, J. (5 de Mayo de 2014). Offshore PSV Caribe. Recuperado el 12 de julio de 2015, de

Offshore PSV Caribe:

<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbmNvZmZzaG9yZXBzdmNhcmlhZXxneDozZDgwY2MwZTVjNzUwYjA2>

Tovar, L., & Cárdenas, D. (2006). La apuesta del offshore. Carta Petrolera N° 113, 12-15.

Tvedt, H. (june de 2012). BIBSYS Brage. Obtenido de BIBSYS Brage:

http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/238192/566095_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y

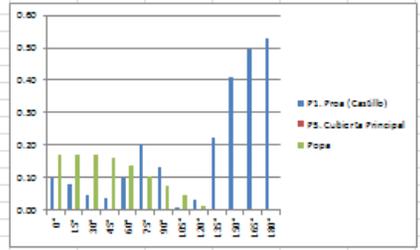
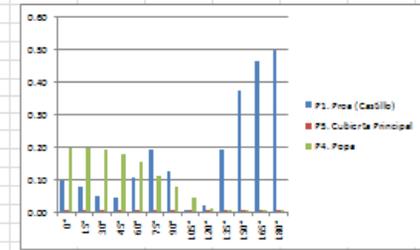
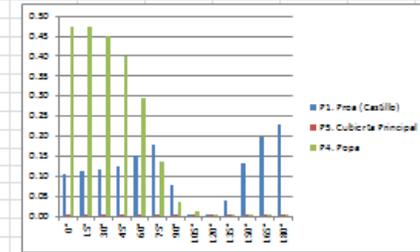
Vidal, J. (s.f.). Enavales. Recuperado el 5 de Mayo de 2015, de Enavales:

<http://www.enavales.com/index.php/documentaci%C3%B3n-ingenier%C3%ADa-arquitectura-naval/category/21-oceanologia-oceanografia.html?download=55:oceanologia>.

Zubaly, R. (1996). Applied Naval Architecture. Centreville, Madriland: Coronell Maritime Press.

Anexos

Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM
Probabilidad																						
Localizaciones		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°								
P1. Proa (Castilla)		0.11	0.11	0.12	0.13	0.15	0.18	0.08	0.00	0.00	0.04	0.13	0.20	0.23	Limite 5%							
P5. cubierta Principal		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
P4. Popa		0.47	0.47	0.45	0.40	0.30	0.14	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
Localizaciones		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°								
P1. Proa (Castilla)		0.29	0.29	0.29	0.30	0.33	0.34	0.20	0.02	0.01	0.08	0.23	0.34	0.38	Limite 5%							
P5. cubierta Principal		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
P4. Popa		0.66	0.65	0.63	0.58	0.48	0.30	0.05	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01								
Probabilidad																						
Localizaciones		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°								
P1. Proa (Castilla)		0.10	0.08	0.05	0.04	0.10	0.13	0.12	0.01	0.02	0.13	0.37	0.46	0.50	Limite 5%							
P5. cubierta Principal		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
P4. Popa		0.20	0.20	0.19	0.18	0.15	0.11	0.08	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00								
Localizaciones		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°								
P1. Proa (Castilla)		0.27	0.24	0.20	0.20	0.29	0.38	0.29	0.04	0.05	0.30	0.50	0.60	0.63	Limite 5%							
P5. cubierta Principal		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
P4. Popa		0.42	0.41	0.39	0.36	0.31	0.24	0.18	0.11	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01								
Probabilidad																						
Localizaciones		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°								
P1. Proa (Castilla)		0.10	0.08	0.05	0.04	0.10	0.20	0.13	0.01	0.03	0.22	0.41	0.50	0.53	Limite 5%							
P5. cubierta Principal		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
P4. Popa		0.17	0.17	0.17	0.16	0.14	0.10	0.08	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00								
Localizaciones		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°								
P1. Proa (Castilla)		0.26	0.23	0.19	0.19	0.29	0.39	0.30	0.05	0.07	0.34	0.54	0.63	0.65	Limite 5%							
P5. cubierta Principal		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01								
P4. Popa		0.39	0.38	0.36	0.33	0.29	0.23	0.18	0.11	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01								



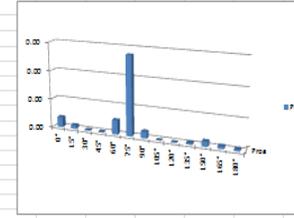
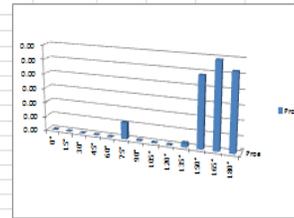
$$P_{gw} = \exp \left[-\frac{h^2}{2m_{0mn}} \right]$$



Anexo 1. Hoja de cálculo Embarque de Agua sobre la Cubierta

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD																
1																																														
2	velocidad 0																																													
3	Condición normal	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°																																
4	Proa. Movimiento vertical relativo	0.42	0.432	0.436	0.455	0.493	0.548	0.37	0.167	0.162	0.296	0.464	0.585	0.641		Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite																
5	Proa. Velocidad vertical relativa	0.366	0.386	0.411	0.452	0.43	0.605	0.454	0.273	0.258	0.348	0.471	0.551	0.586		Proa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1%														
6																																														
7	Condición extrema																																													
8	Proa. Movimiento vertical relativo	0.761	0.766	0.762	0.785	0.844	0.874	0.583	0.254	0.2	0.381	0.647	0.864	0.37		Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite																
9	Proa. Velocidad vertical relativa	0.512	0.534	0.558	0.602	0.652	0.766	0.551	0.308	0.286	0.419	0.536	0.717	0.773		Proa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1%														
10																																														
11																																														
12	velocidad 10																																													
13	Condición normal	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°		Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite																
14	Proa. Movimiento vertical relativo	0.402	0.371	0.314	0.3	0.415	0.573	0.451	0.192	0.238	0.565	0.347	1.222	1.341		Proa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1%														
15	Proa. Velocidad vertical relativa	0.088	0.086	0.087	0.104	0.193	0.363	0.434	0.352	0.486	0.347	1.432	1.888	2.053																																
16																																														
17	Condición extrema																																													
18	Proa. Movimiento vertical relativo	0.709	0.651	0.576	0.578	0.762	0.382	0.75	0.301	0.311	0.777	1.373	1.827	2.006		Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite																
19	Proa. Velocidad vertical relativa	0.153	0.123	0.154	0.165	0.291	0.525	0.563	0.332	0.568	1.207	1.355	2.433	2.727		Proa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1%														
20																																														
21																																														
22																																														
23	velocidad 12																																													
24	Condición normal	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°		Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite																
25	Proa. Movimiento vertical relativo	0.406	0.372	0.309	0.286	0.403	0.532	0.463	0.202	0.268	0.63	1.049	1.347	1.477		Proa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1%														
26	Proa. Velocidad vertical relativa	0.065	0.063	0.064	0.079	0.162	0.354	0.437	0.378	0.555	1.089	1.744	2.219	2.425																																
27																																														
28	Condición extrema																																													
29	Proa. Movimiento vertical relativo	0.702	0.64	0.56	0.558	0.753	1.012	0.775	0.335	0.354	0.871	1.519	2.008	2.195		Probabilidad	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	Limite																
30	Proa. Velocidad vertical relativa	0.091	0.083	0.096	0.129	0.251	0.509	0.573	0.425	0.661	1.408	2.217	2.313	3.18		Proa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1%														
31																																														
32																																														
33																																														
34	calado de la seccion media																3.97																													
35	Velocidad vertical critica																2.4175																													
36																																														
37																																														
38																																														
39																																														
40																																														
41																																														
42																																														
43																																														
44																																														
45																																														
46																																														
47																																														
48																																														
49																																														
50																																														
51																																														
52																																														
53																																														

$$P_s = \exp\left[-\frac{t^2}{2m_{0rvm}}\right] \times \exp\left[-\frac{v^2}{2m_{0rvv}}\right]$$



Anexo 2. Hoja de cálculo Impacto Hidrodinámico / Slamming

