



FACULTAD DE INGENIERÍA

**Memoria de titulación para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico**

**DISEÑO DE UN TERMINAL MARÍTIMO MULTIBOYA PARA
TRANSFERENCIA DE PETRÓLEO EN CORONEL, REGIÓN
DEL BIOBÍO, CHILE.**

Javier Ignacio Herrera Vicenzot

Mayo 2019

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO DE UN TERMINAL MARÍTIMO MULTIBOYA PARA TRANSFERENCIA DE PETRÓLEO EN CORONEL, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.”

Javier Ignacio Herrera Vicenzot

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
Sr. Patricio Winckler Grez. Profesor guía	_____	_____
Sr. Matías Carvajal Ramírez. Revisor	_____	_____
Sr. Jorge Rojas Alcaíno. Revisor	_____	_____

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO,
VALPARAÍSO, CHILE
2019

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a la empresa consultora SAIMIC LTDA, que hizo posible que desarrolle este proyecto, sobre todo a Matías Carvajal, quien fue mi compañero de trabajo y siempre con buena voluntad respondía mis dudas y me aportaba un buen consejo.

Agradecer al profesor Patricio Winckler por su aporte en mi carrera y su buena disposición a ayudar.

Agradecer al profesor Álvaro Valdivia, que marcó un antes y un después en mi formación.

A Russell por su amor infinito, las aventuras vividas y la confianza que ha depositado en mí.

A mi familia, gracias por su paciencia y apoyo incondicional.

A Felipe Bravo, que siempre me motivó a terminar este proyecto, poniéndole empeño toda una temporada en la biblioteca.

A mis amigos de carrera: Seba, Mauro, Jazzman, Federici, Gonya, Guti, Marco. Gracias por los momentos vividos durante este proceso.

“Un buen viajero no tiene planes fijos ni la intención de llegar” Lao-Tse

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	UBICACIÓN DEL PROYECTO.....	4
1.2	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	6
2	OBJETIVOS	7
2.1	OBJETIVOS GENERALES.....	7
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3	MARCO TEÓRICO	8
3.1	TERMINALES MULTIBOYA.....	8
3.1.1	AMARRE DE BOYA CONVENCIONAL (CBM).....	8
3.1.2	BOYAS DE AMARRE (ABMs).....	9
3.2	COMPONENTES DEL SISTEMA DE AMARRE.....	10
3.3	DISEÑO DE PARTES INDIVIDUALES DE BOYAS DE AMARRE.....	14
3.3.1	CADENAS DE ANCLAJE.....	14
3.3.2	ANCLAJES DE PESO MUERTO (SINKER).....	17
3.4	MÉTODOS DE ANÁLISIS DE AMARRE.....	19
3.5	SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CARGA.....	20
3.5.1	CAÑERÍAS SUBMARINAS.....	20
3.5.2	MANGUERAS FLEXIBLES.....	21
3.6	PIPELINE END MANIFOLD (PLEM).....	24
3.7	BOYARÍN DE LEVANTE.....	25
4	METODOLOGÍA	27
4.1	ESTUDIO DE CONDICIONES NATURALES DEL SECTOR.....	27
4.1.1	ESTUDIO DE OLEAJE.....	27
4.1.2	ESTUDIO DE MAREAS Y CORRIENTES.....	33
4.1.3	ESTUDIO DE VIENTOS.....	33
4.2	DOWNTIME OPERACIONAL.....	33
4.2.1	DOWNTIME POR OLEAJE.....	34
4.2.2	DOWNTIME POR VIENTOS.....	34
4.2.3	DOWNTIME POR CORRIENTES.....	34
4.3	PROPUESTA DE LAYOUT.....	34
4.4	CÁLCULO DE FONDEO.....	36
4.5	SISTEMA DE FIJACIÓN CAÑERÍAS SUBMARINAS.....	39
4.6	SISTEMA DE CAÑERÍAS FLEXIBLES:.....	40
4.7	DEFINICIÓN BOYARÍN DE LEVANTE.....	42
5	RESULTADOS	43
5.1	ESTUDIO DE CONDICIONES NATURALES DEL SECTOR.....	43
5.1.1	ESTUDIO DE OLAS.....	43
5.1.2	ESTUDIO DE CORRIENTES.....	47
5.1.3	ESTUDIO DE MAREAS.....	50
5.1.4	ESTUDIO DE VIENTOS.....	51
5.2	ESTIMACIÓN DEL DOWNTIME OPERACIONAL.....	52
5.2.1	DOWNTIME POR OLEAJE.....	52
5.2.2	DOWNTIME POR VIENTO.....	55
5.2.3	DOWNTIME POR CORRIENTES.....	56
5.3	LAYOUT DEL TERMINAL MARÍTIMO.....	57

5.3.1	BUQUE A SER AMARRADO Y SUS PROPIEDADES	57
5.3.2	DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL AMARRE.....	58
5.3.3	SELECCIÓN DE ALTERNATIVA	70
5.3.4	TRAZADO CAÑERÍAS SUBMARINAS	70
5.4	CÁLCULO DE FONDEO	71
5.4.1	CÁLCULO DE CARGAS SOBRE EL BUQUE	71
5.4.2	CÁLCULO DE CARGAS SOBRE LOS ELEMENTOS DE AMARRE.....	73
5.4.3	DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE FONDEO.....	75
5.5	DISEÑO DE LÍNEA DE TRANSFERENCIA DE PETRÓLEO	84
5.5.1	CARACTERÍSTICAS CAÑERÍAS SUBMARINAS RÍGIDAS	84
5.5.2	MONTAJE Y LANZAMIENTO AL MAR DE LAS CAÑERÍAS SUBMARINAS	84
5.5.3	DISEÑO DE MUERTOS DE FIJACIÓN	86
5.6	CAÑERÍAS FLEXIBLES	106
5.6.1	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE FLEXIBLES.....	107
5.7	DEFINICIÓN DEL BOYARÍN DE LEVANTE.....	107
6	DISCUSIONES Y OBRAS COMPLEMENTARIAS	110
6.1	OBRAS COMPLEMENTARIAS.....	110
6.1.1	ZONA DE PLAYA Y TERRENO DE PLAYA	110
6.1.2	CASETA DE VÁLVULA	110
6.1.3	SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN MARÍTIMA.....	110
6.1.4	SISTEMA DE ADUCCIÓN DE AGUA DE MAR	110
6.2	DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
7	CONCLUSIONES.....	113
ANEXO A.	CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN EL SECTOR DE ESTUDIO	117
ANEXO B.	FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD	121
ANEXO C.	MATRICES DE COMPARACIÓN.....	122
ANEXO D.	CALCULO DE FUERZAS SOBRE EL BUQUE.....	126
ANEXO E.	VERIFICACIÓN DE ELEMENTOS DE FONDEO	136
I.	VERIFICACIÓN BOYA Nº1 (ALETA ESTRIBOR).....	136
II.	VERIFICACIÓN BOYA Nº2 (POPA)	140
III.	VERIFICACIÓN BOYA Nº3 (ALETA BABOR)	144
IV.	VERIFICACIÓN ANCLAJE AMURA ESTRIBOR.....	148
V.	VERIFICACIÓN ANCLAJE AMURA BABOR	150
ANEXO F.	FICHA TÉCNICA DE CAÑERIAS DE ACERO.....	152
ANEXO G.	FICHA TÉCNICA VÁLVULA BREAK AWAY.....	153
ANEXO H.	FICHA TÉCNICA BOYARÍN DE LEVANTE	154
ANEXO I.	FICHA TÉCNICA CADENAS PARA FONDEO CON MALLETE.....	155
ANEXO J.	FICHA TÉCNICA BOYA DE AMARRE	156
ANEXO K.	BOYAS DE AMARRE Y PERNADAS DE TRABAJO	157
ANEXO L.	DIMENSIONAMIENTO MUERTOS DE FIJACIÓN PARA CAÑERÍAS SUBMARINAS	165
ANEXO M.	TERMINALES MARÍTIMOS PETROLEROS EN CHILE	167

ANEXO N. VERIFICACIÓN ESTABILIDAD DE CAÑERÍAS SUBMARINAS	168
GLOSARIO DE TÉRMINOS	169
BIBLIOGRAFÍA.....	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Configuración de amarre multiboya típico para carga de combustible.....	3
Figura 1.2. Localización del área de estudio, con referencia a la planimetría regional	4
Figura 1.3. Localización del área de estudio en referencia a Carta del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.....	5
Figura 3.1. Layout de amarre de boya convencional (CBM)	8
Figura 3.2. Layout todas las boyas de amarre (ABMs).....	9
Figura 3.3. Componentes típicos del sistema de fijación de amarre sin carga	10
Figura 3.4. Componentes típicos del sistema de fijación de amarre bajo máxima carga..	11
Figura 3.5. Tipos de anclaje simplificados.....	13
Figura 3.6. Componentes de una boya de amarre	14
Figura 3.7. Cadenas de fondeo.....	15
Figura 3.8. Ejemplo de arreglos de cadena.....	15
Figura 3.9. Notación para muerto y cadena del ancla para boyas de amarre.....	16
Figura 3.10. Tipos de anclaje por peso muerto	17
Figura 3.11. Bloque de hormigón con barra de acero	18
Figura 3.12. Tuberías de acero sin costura.....	21
Figura 3.13. Ejemplo de configuración de flexibles en un sistema de amarre multiboya ..	22
Figura 3.14. Conexión manifold con mangueras flexibles	23
Figura 3.15. Manguera desmontable para el caso de una monoboya	24
Figura 3.16 . Layout simplificado para tubería PLEM.....	25
Figura 3.17. Boyarín de levante típico con conexión al flexible	26
Figura 4.1. Ubicación nodo N10 Talcahuano	27
Figura 4.2. Extensión mallas numéricas.....	29
Figura 4.3. Propagación de oleaje de altura unitaria SW y $T_p=15s$	31
Figura 4.4. Propagación de oleaje de altura unitaria W y $T_p=15s$	31
Figura 4.5. Propagación de oleaje de altura unitaria NW y $T_p=15s$	32
Figura 4.6. Cálculo de aproximación del largo de flexibles.....	41
Figura 5.1. Serie de tiempo H_s [m] en la zona del proyecto	44
Figura 5.2. Gráfico de correlación método Weibull-Petraukas $k=1$	45
Figura 5.3. Gráfico H retorno [m] vs T retorno [años]	46
Figura 5.4. Rosa de corrientes.....	49
Figura 5.5. Rosa de vientos	52
Figura 5.6. Cálculo de downtime en por oleaje	53
Figura 5.7. Cálculo de downtime en por oleaje dirección NW	54
Figura 5.8. Estimación de downtime operacional por viento.....	55
Figura 5.9. Estimación de downtime operacional por corriente	56
Figura 5.10. Buque tanque de diseño	57
Figura 5.11. Aproximación buque en CBM.....	60
Figura 5.12. Aproximación buque en ABM.....	60
Figura 5.13. Alternativa layout nave LOA 242.8, CBM con 3 boyas de amarre y 2 anclas a proa	63
Figura 5.14. Alternativa layout nave LOA 242.8, CBM con 5 boyas de amarre y 2 anclas a proa	66
Figura 5.15. Alternativa layout nave LOA 242.8, ABM con 5 boyas de amarre	69
Figura 5.16. Fuerzas y momentos por viento sobre el buque en lastre y en carga.....	72
Figura 5.17. Modelo de sistema de amarre para la nave	73

Figura 5.18. Resultantes de la envolvente de las combinaciones de carga (tonf)	74
Figura 5.19. Planta configuración Boya N°1	76
Figura 5.20. Planta configuración Boya N°2.....	77
Figura 5.21. Planta configuración Boya N°3.....	77
Figura 5.22. Configuración muerto de término pernada 1 y 2.....	78
Figura 5.23. Configuración muerto de término pernada 3 y 4.....	78
Figura 5.24. Configuración muerto de término pernada 5 y 6.....	79
Figura 5.25. Configuración retenida Boya N°1	79
Figura 5.26. Configuración retenida Boya N°2	80
Figura 5.27. Configuración retenida Boya N°3	80
Figura 5.28. Catenaria de cadena suspendida Boya N°1	81
Figura 5.29. Catenaria de cadena suspendida Boya N°2.....	81
Figura 5.30. Catenaria de cadena suspendida Boya N°3.....	82
Figura 5.31. Catenaria de cadena suspendida ancla amura babor	82
Figura 5.32. Catenaria suspendida ancla amura estribor	83
Figura 5.33. Esquema muerto tipo tronco piramidal.....	87
Figura 5.34. Diagrama de cuerpo libre cañería-muerto de fijación	93
Figura 5.35. Resumen gráfico de los cálculos obtenidos	94
Figura 5.36. Esquema sistema de elementos de término.....	96
Figura 5.37. Muerto de término unitario	97
Figura 5.38. Aplicación de fuerza en caso deriva Buque dirección S-N	99
Figura 5.39. Planta trazado cañerías de petróleo con disposición de muertos de fijación	100
Figura 5.40. Planta trazado inicial cañerías de petróleo con disposición de muertos de fijación	101
Figura 5.41. Planta trazado final cañerías de petróleo con disposición de muertos de fijación	102
Figura 5.42. Alzado longitudinal de cañerías con disposición de muertos de fijación	103
Figura 5.43. Alzado longitudinal parte inicial de cañerías con disposición de muertos de fijación	104
Figura 5.44. Alzado longitudinal parte final de cañerías con disposición de muertos de fijación	105
Figura 5.45. Flexible Mainline 512	106
Figura 5.46. Estados de carga sobre el boyarín de levante	108
Figura A.1. Histograma de Hs [m].....	118
Figura A.2. Histograma de Dirección	119
Figura A.3. Histograma de Tp [s]	119
Figura A.4. Rosa de altura de oleaje Hs[m].....	120
Figura A.5. Rosa de período de oleaje Tp [s].....	120
Figura H.1. Ficha técnica boyarín de levante	154
Figura J.1. Hawsepiped and Tension Bar Mooring Buoy.....	156
Figura K.1. Boya N°1 con retenida.....	159
Figura K.2. Boya N°1 – pernada 1 y pernada 2.....	160
Figura K.3. Boya N°2 con retenida.....	161
Figura K.4. Boya N°2 – pernada 3 y pernada 4.....	162
Figura K.5. Boya N°3 con retenida.....	163
Figura K.6. Boya N°2 – pernada 5 y pernada 6.....	164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Resumen ventajas y desventajas de tipos de anclajes.....	11
Tabla 3.2. Ejemplo de configuración de flexibles para sistemas de amarre multiboya	22
Tabla 4.1. Cartas náuticas del SHOA	28
Tabla 4.2. Especificaciones de mallas numéricas utilizadas para propagación de oleaje. 28	
Tabla 4.3. Direcciones de oleaje incidente en coordenadas náuticas	30
Tabla 4.4. Escala numérica de juicios para la toma de decisiones.....	35
Tabla 4.5. Esquema del modelo jerárquico	36
Tabla 4.6. Combinaciones de carga.....	38
Tabla 4.7. Criterios de movimientos para condiciones de trabajo seguras	42
Tabla 5.1. Matriz de coeficientes de agitación (Ka).....	43
Tabla 5.2. Matriz de direcciones	43
Tabla 5.3. Alturas de ola máximas método POT	45
Tabla 5.4. Período de retorno asociado a distribución Weibull $k=1$	46
Tabla 5.5. Tabla de incidencia de corrientes - correntómetro superficial	47
Tabla 5.6. Tabla de incidencia de corrientes - correntómetro profundo.....	48
Tabla 5.7. Caracterización de la marea de la Bahía de Coronel	50
Tabla 5.8. Tabla de incidencia de vientos en el sector de estudio.....	51
Tabla 5.9. Máxima altura significativa de oleaje para diferentes direcciones.....	53
Tabla 5.10. Características nave de diseño	57
Tabla 5.11. Profundidades de los elementos de amarre y fondeo de la alternativa 1	62
Tabla 5.12. Profundidades de los elementos de amarre y fondeo alternativa 2.....	65
Tabla 5.13. Profundidades de los elementos de amarre y fondeo alternativa 3.....	68
Tabla 5.14. Matriz de selección de alternativas mediante método AHP	70
Tabla 5.15. Parámetros oceanográficos para fuerzas sobre la nave.....	71
Tabla 5.16. Fuerzas y momentos sobre el buque en lastre y en carga	72
Tabla 5.17. Fuerza de amarre-LOA 242.8 -Modelo SAP2000.....	74
Tabla 5.18. Resumen de configuraciones calculadas para las boyas de amarre	75
Tabla 5.19. Poder de agarre vs ángulo de inclinación de cadena	83
Tabla 5.20. Características cañerías submarinas rígidas.....	84
Tabla 5.21. Dimensiones muerto de fijación	87
Tabla 5.22. Parámetros oceanográficos considerados.....	88
Tabla 5.23. Velocidades máximas de ola y corriente por veril.....	91
Tabla 5.24. Cargas hidrodinámicas sobre la cañería	92
Tabla 5.25. Separación máxima entre muertos de fijación	95
Tabla 5.26. Características cañería flexible Mainline 512	106
Tabla 5.27. Pesos de los elementos asociados al boyarín y cadena de levante.	108
Tabla A.1. Tabla de incidencia Hs-Dir.....	117
Tabla A.2. Tabla de incidencia Tp-Dir.....	117
Tabla A.3. Tabla de incidencia Hs [m]-Tp[s].....	118
Tabla B.1. Funciones de distribución de probabilidad clima extremo	121
Tabla F.1. Propiedades cañerías de acero	152
Tabla G.1. Tensión de rotura válvula break away	153
Tabla I.1. Ficha técnica cadenas para fondeo.....	155
Tabla K.1. Listado general de elementos Boya N°1 (Aleta estribor).....	157
Tabla K.2. Listado general de elementos Boya N°2 (Popa)	158
Tabla K.3. Listado general de elementos Boya N°3 (Aleta babor).....	158

RESUMEN

El presente proyecto se denomina “Diseño de un Terminal Marítimo Multiboya para Transferencia de Petróleo en Coronel, Región del Biobío, Chile”, cuyo objetivo principal es diseñar un fondeadero destinado para el amarre de naves Oil Tanker, además del sistema de transferencia de carga mediante cañerías submarinas. Esto permitiría llevar los combustibles líquidos desde el buque hasta las instalaciones proyectadas en los tanques de almacenamiento.

Las obras de este proyecto se clasifican en dos tipos:

- Obras asociadas a la estructuración y operación del terminal marítimo, con un fondeadero para naves, mediante un sistema de boyas de amarre ancladas al fondo marino.
- Obras asociadas a la transferencia de petróleo entre planta y fondeadero, mediante dos cañerías submarinas; una para productos livianos y otra para productos pesados.

1 INTRODUCCIÓN

El sector hidrocarburos tiene un rol crucial en la producción de energía en Chile, siendo el sector más relevante desde el punto de vista de las energías primarias dentro de la matriz energética (Agostini & Saavedra, 2009).

Según datos de CNE (2017), considerando la producción de recursos energéticos de Chile y los flujos de importación y exportación, la matriz de energía primaria durante el año 2016 alcanzó un total de 312.857 Tera calorías”...” (TCal). El principal aporte proviene de los combustibles fósiles (petróleo crudo, gas natural y carbón) que suman un 70%. El resto lo conforman la producción de biomasa (23%), y en menor proporción hidroelectricidad, solar y eólica con un 7%.

La industria del petróleo, al tener un peso tan importante en la producción energética, tiene una influencia significativa sobre la capacidad productiva del país, ya que la energía sigue siendo uno de los principales insumos en los procesos productivos que se utilizan en Chile. Por esta razón, resulta particularmente importante que los distintos mercados que componen la industria funcionen en forma competitiva, ya que ello permite la asignación eficiente de los recursos (Agostini & Saavedra, 2009).

Los terminales marítimos juegan un papel esencial dentro de la logística de la distribución de producción de hidrocarburos. Están ubicados en distintos puntos a lo largo del litoral marítimo y fluvial del país y sus características dependen de cada caso en particular.

“Los terminales marítimos de transferencia de productos líquidos o gaseosos, son fondeaderos para naves estanques, que cuentan con instalaciones apropiadas consistentes en cañerías conductoras destinadas a la carga o descarga de productos líquidos o gaseosos” (Decreto 9, 2018).

Según ROM (2012) las configuraciones físicas de obra de fondeo que suelen ser más convenientes para la manipulación de graneles líquidos petrolíferos y químicos (amoníaco, sulfúrico, etc.) son las monoboyas y campos de boyas.

OCIMF (2010) afirma que los sistemas de amarre multiboya, de ahora en adelante MBM por sus siglas en inglés, proporcionan flexibilidad a la operación de un terminal en áreas donde las condiciones ambientales pueden hacer que sea impracticable o demasiado costoso para operar un muelle convencional o monoboya.

Operacionalmente los MBM permiten mayor margen de desplazamiento en los 3 ejes dada la existencia de flexibles de unión, en tanto que en el caso de los muelles de penetración disminuyen ese grado de libertad al tener que limitar las olas operacionales y los desplazamientos de la nave sobre la estructura.

Los MBM se encuentran definidos por las condiciones del sitio y las condiciones particulares de maniobrabilidad. Estos sistemas se pueden clasificar en función del número y posición de las boyas a las que se amarran las espías del barco (ROM 2.0-11, 2012).

OCIMF (2010) define los MBM como instalaciones en las que un buque tanque suele estar amarrado por una serie de boyas, normalmente en números de 3 a 7, situadas a cierta distancia del buque, o una combinación de boyas de amarre y una o más anclas propias del buque, para ser amarrado en un punto fijo (OCIMF, 2010).

Se define buque tanque o petrolero aquél construido o adaptado para transportar, principalmente, hidrocarburos a granel en sus espacios de carga; este término comprende los buques de carga combinados y los buques tanques químicos, cuando estén

transportando cargamento total o parcial de hidrocarburos a granel (Autoridad Marítima Portuaria, 2010)

Según OCIMF (2010), los MBM generalmente se usan en áreas donde las alturas de olas significativas son inferiores a 2,0 metros y se dirigen hacia, o por lo menos, cerca de la proa del buque. Sin embargo, las operaciones de atraque y desconexión están típicamente restringidas a alturas de ola de hasta 1,5 metros, sujetas a las limitaciones de las embarcaciones de apoyo. Las instalaciones con regímenes más agresivos, como mayores alturas de oleaje o períodos de oleaje más largos, pueden requerir un sistema de amarre monoboya.

Un MBM permite que el fondeadero se ubique en aguas más profundas sin necesidad de dragado o la construcción de estructuras sobre el agua, como caminos de aproximación y caballetes de tuberías, lo cual aumenta considerablemente los costos de construcción (OCIMF, 2010).

La operación de carga y descarga de productos, se efectúa por intermedio de las bombas propias de la nave una vez que el petrolero se encuentra estable en su sistema de amarre y las condiciones ambientales lo permiten. Este procedimiento consiste en recoger las mangueras sumergidas (flexibles), y conectarlas a su colector en medio del buque (manifold). El otro extremo de la manguera está conectado al extremo del oleoducto el cual está fijo en el fondo marino, que transporta el producto desde o hasta cualquier instalación en tierra. Al terminar la operación de carga, la manguera se coloca sobre el lecho marino y está lista para recogerse de nuevo cuando llegue otro petrolero.

Por lo general, varios tanques de almacenamiento se unen para formar una granja capaz de almacenar miles de toneladas de petróleo, agua, u otro líquido petroquímico. Los depósitos verticales van desde 20 a 5000 m³ de volumen.

El Decreto 160 (2009) define cañería submarina como el conjunto de todos los tubos de empalme, piezas de ensamble, válvulas y demás aparatos y dispositivos accesorios, que yacen en el suelo o subsuelo de las áreas submarinas de un medio acuático, sea marino, fluvial o lacustre que se utilizan para o con ocasión del trasegamiento de combustibles líquidos (CL).

Los sistemas de transferencia de carga mediante cañerías submarinas son una excelente solución, ya que las cañerías se apoyan sobre el lecho marino de forma natural, y la fijación de estas al fondo marino se ve incrementada por el efecto de los muertos fijación. El costo de esta solución es mucho menor que en base a un muelle de penetración, además de presentar complicaciones en términos operacionales debido que se debe tener personal y operadores en el cabezo del muelle. Por lo mismo, es más conveniente las cañerías submarinas, dado que su operación es más sencilla e involucra poco personal/operadores. En Chile los terminales marítimos petroleros se ubican a lo largo de todo el territorio nacional, de Arica a Punta Arenas. Según Directemar (2018) en Chile hay 27 terminales marítimos petroleros. Estos se caracterizan según el tamaño de las naves que pueden recibir, los productos a transferir y las toneladas/hora de recepción y entrega.

La mayoría de MBM en Chile son amarrados con 2 o 3 boyas de amarre a proa y con las anclas propias del buque. También se utilizan como elementos de amarre los duques de alba y los postes de amarre, como es el caso de Terminal Marítimo Cabo Negro Enap en Punta Arenas, el Terminal Marítimo Petrolero ENAP San Vicente y el Terminal Marítimo Interasid en Mejillones.

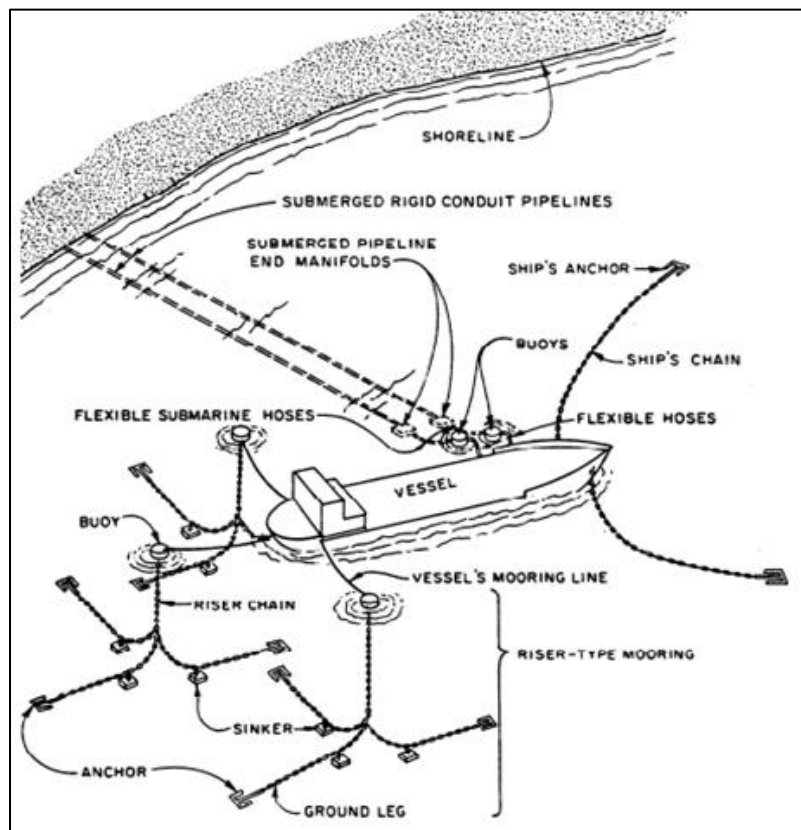
En cuanto al sistema de transferencia de carga que se utiliza en los terminales marítimos petroleros, la mayoría de estos utiliza sistema de transferencia mediante cañerías submarinas rígidas. En cuanto a los terminales marítimos que transfieren productos mixtos,

ya sea petróleo, soda cáustica, metanol, subproductos químicos, GLP, generalmente optan por soluciones de cañerías aéreas.

En el ANEXO M se presenta una tabla con todos los terminales marítimos petroleros de Chile, donde se puede observar la cantidad de elementos de amarre que usan y su sistema de transvención de carga.

La Figura 1.1 muestra una configuración de amarre multiboya típico para carga de combustible, con 3 boyas de amarre a popa, 2 anclas a proa y 2 cañerías rígidas para el transporte de productos.

Figura 1.1. Configuración de amarre multiboya típico para carga de combustible



FUENTE: OCIMF (2010)

El terminal marítimo está destinado a la recepción de productos limpios, principalmente petróleo diésel y gasolina.

Los productos serán de tipo liviano y pesado, los cuales serán transferidos mediante dos cañerías submarinas rígidas, una para cada producto. A continuación se indican los tipos de productos a transferir:

- Combustibles Livianos Clase I: Gasolina 93 Octanos, Gasolina 97 Octanos.
- Combustibles Livianos Clase II: Petróleo Diésel, Kerosene.
- Combustibles Pesados Clase III: Petróleos Combustibles, PC N°6, PC N°5, IFOs.

Este trabajo está materializado a través de una memoria de cálculo (cuerpo principal del documento), la cual se detalla tanto el diseño de los elementos de amarre del terminal

marítimo multiboya, como el diseño del sistema de fijación de las cañerías submarinas para transporte de petróleo.

1.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO

Coronel es una comuna chilena ubicada en el litoral costero de la zona centro-sur del país, en la Región del Biobío, Provincia de Concepción, a 30 kilómetros al sur de la ciudad de Concepción. Posee una superficie de 279 km². Limita al Norte con la comuna de San Pedro de la Paz, al Sur con las comunas de Lota y Santa Juana, al Oriente con el Río Biobío, y al Poniente con el Océano Pacífico (Municipalidad de Coronel, s.f).

En la Figura 1.2 grafica la localización de la comuna de Coronel, con referencia a la planimetría regional.

Figura 1.2. Localización del área de estudio, con referencia a la planimetría regional



FUENTE: PLAN DE DESARROLLO COMUNAL – PLADECO COMUNA DE CORONEL

Coronel se ha desarrollado como uno de los complejos portuario industriales más modernos e importantes del sur del país ya que reúne condiciones favorables debido a una serie de factores:

- Protección por el Golfo de Arauco y la Isla Santa María.
- Factores climáticos relacionados a gran cantidad de días sin vientos, lo que permite que la actividad portuaria se desarrolle sin inconvenientes durante todo el año.

- Vías de acceso adecuadas a través de la Ruta 160 y de la red ferroviaria, infraestructura que asegura el desplazamiento de carga desde y hacia el subsistema portuario comunal.

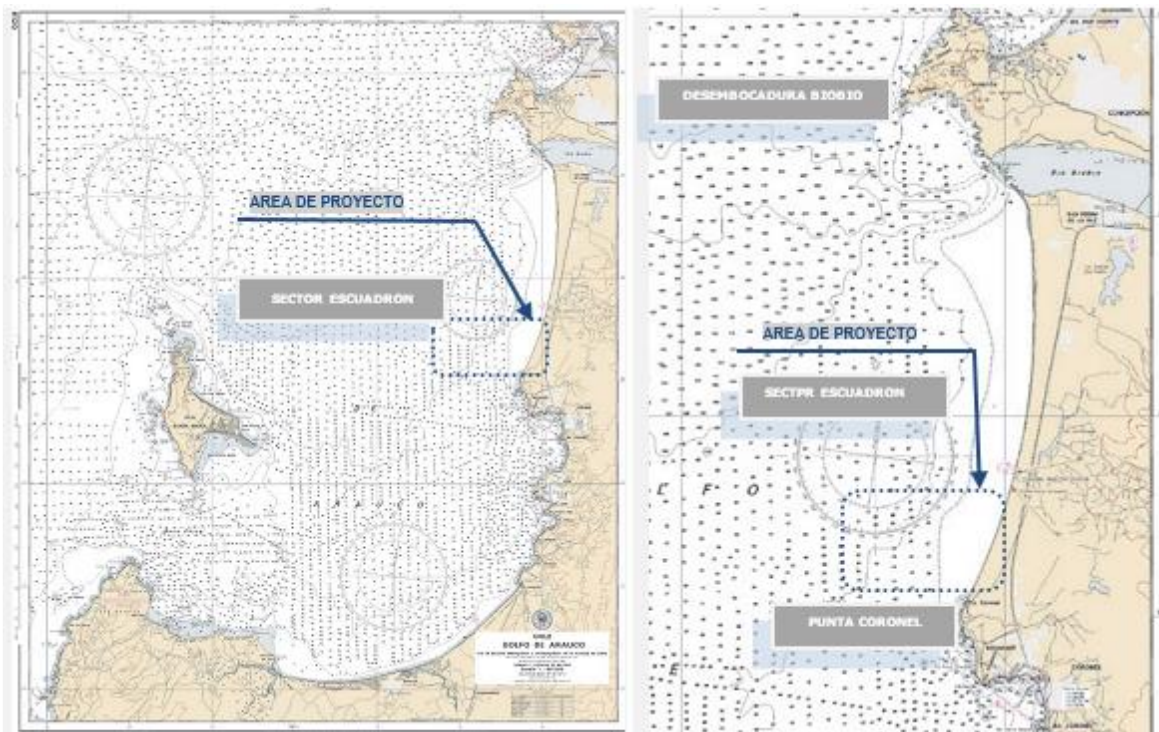
La locación del proyecto está ubicada en las siguientes coordenadas:

- Latitud: 36°58'38.35"S
- Longitud: 73°10'38.02"O

Esta zona es ideal para la instalación de un terminal marítimo petrolero, ya que se tiene la experiencia del terminal marítimo Oxiquín (Escuadrones), y está permitida la presencia de industrias y almacenamiento inofensivo y/o molesto. El uso del suelo corresponde a terrenos urbanos de uso industrial según el Plano Regulador vigente a la fecha de la comuna de Coronel.

La Figura 1.3 muestra la carta SHOA con planimetría local del área de estudio.

Figura 1.3. Localización del área de estudio en referencia a Carta del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile



FUENTE: CARTA DEL SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA DE CHILE (S.H.O.A) Nº 6.120 "GOLFO DE ARAUCO" DATUM WGS-84, EDICIÓN 2004.

1.2 ALCANCES Y LIMITACIONES

- El proyecto está enfocado en la parte marítima; en cuanto a la parte terrestre se entregan sólo datos generales.
- No se realiza el diseño de la caseta de válvulas en el terreno de playa para las líneas de transferencia de petróleo.
- No se realiza el diseño de sistemas de balizas para señalización para la entrada o salida de buques.
- El proyecto no cuenta con una concesión marítima que avale la ubicación de las obras.
- El proyecto no incluye un plan de contingencia en caso de accidentes de derrame de petróleo.
- El proyecto no incluye estudios de impacto ambiental.
- No se realiza el diseño de protección anticorrosiva para las cañerías de transporte de productos; sólo se considera protección pasiva mediante recubrimiento.
- No se realiza un diseño para sistema contra incendio ni un sistema de descarga de aguas lluvias.
- No se realiza un estudio de maniobrabilidad para el fondeo de la nave en el terminal marítimo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GENERALES

- Diseñar un sistema de amarre multiboya que permita la operatividad de naves Oil Tanker.
- Diseñar un sistema de transferencia para descarga de petróleo mediante cañerías submarinas ancladas al fondo marino.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las condicionantes naturales del sector en el que se emplazarán las obras.
- Estimar el downtime operacional del terminal marítimo.
- Proponer layout para la configuración del terminal marítimo.
- Desarrollar el cálculo del sistema de fondeo de la nave.
- Definir el sistema de transferencia de carga mediante cañerías submarinas rígidas y flexibles.
- Determinar el dimensionamiento y distancia entre los muertos de fijación para las cañerías submarinas rígidas.
- Definir el boyarín de levante para las cañerías flexibles.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 TERMINALES MULTIBOYA

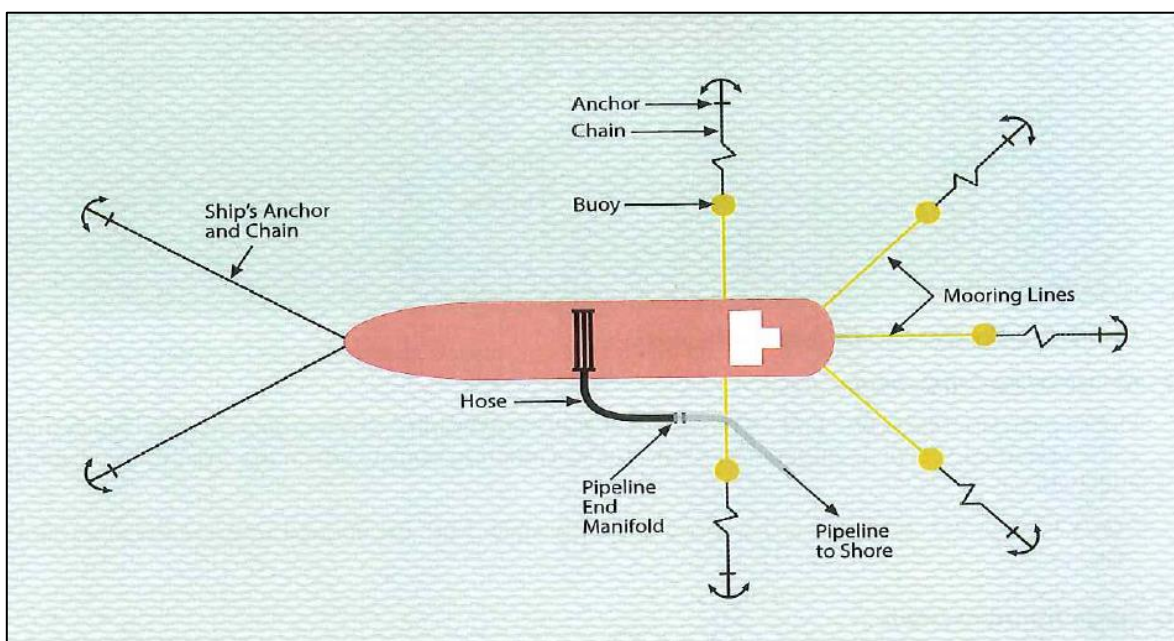
Según OCIMF (2010, pág. 3) existen dos configuraciones de sistemas multiboyas que se encuentran en toda la industria, los sistemas de amarre convencional (Conventional buoy Mooring CBM) y los sistemas de amarre con todas las boyas (All Buoy Moorings ABMs).

3.1.1 AMARRE DE BOYA CONVENCIONAL (CBM)

Los sistemas de amarre convencional de boyas (CBM), también llamados sistemas de amarre de boyas múltiples (MBM), son utilizados para transferir productos, tales como crudo y gas licuado de petróleo (LPG) entre los buques petroleros y las instalaciones en tierra. Los CBM son el tipo más común de sistemas multiboya instalado en todo el mundo (OCIMF, 2010).

Los CBM, son amarres marítimos costa afuera en los cuales la proa del buque se sostiene en posición por sus propias anclas. Se instalan varias boyas de amarre, típicamente de 3 a 7, para asegurar la popa, como se muestra en la Figura 3.1.

Figura 3.1. Layout de amarre de boya convencional (CBM)



FUENTE: OCIMF (2010)

Las ventajas de un CBM son que proporciona la menor cantidad de obstrucción durante el fondeo y es el más rentable en términos de fabricación e instalación.

La desventaja de un CBM es que depende de los anclajes del buque para proporcionar la restricción del arco. Los anclajes de la nave proporcionan una capacidad de amarre limitada en comparación con las patas de amarre permanentes, por lo que este tipo de disposición puede limitarse a sitios con condiciones ambientales relativamente suaves, además de las características granulométricas del fondo (OCIMF, 2010, pág. 3).

En Chile, el CBM es sistema más utilizado. La mayor cantidad de terminales marítimos tiene de 2 a 3 boyas de amarre.

Por ejemplo, el Terminal Marítimo Comap Guayaacan tiene 2 boyas de amarre además de las anclas propias del buque, para naves con eslora máxima de 190 [m], las cuales transfieren petróleo limpio.

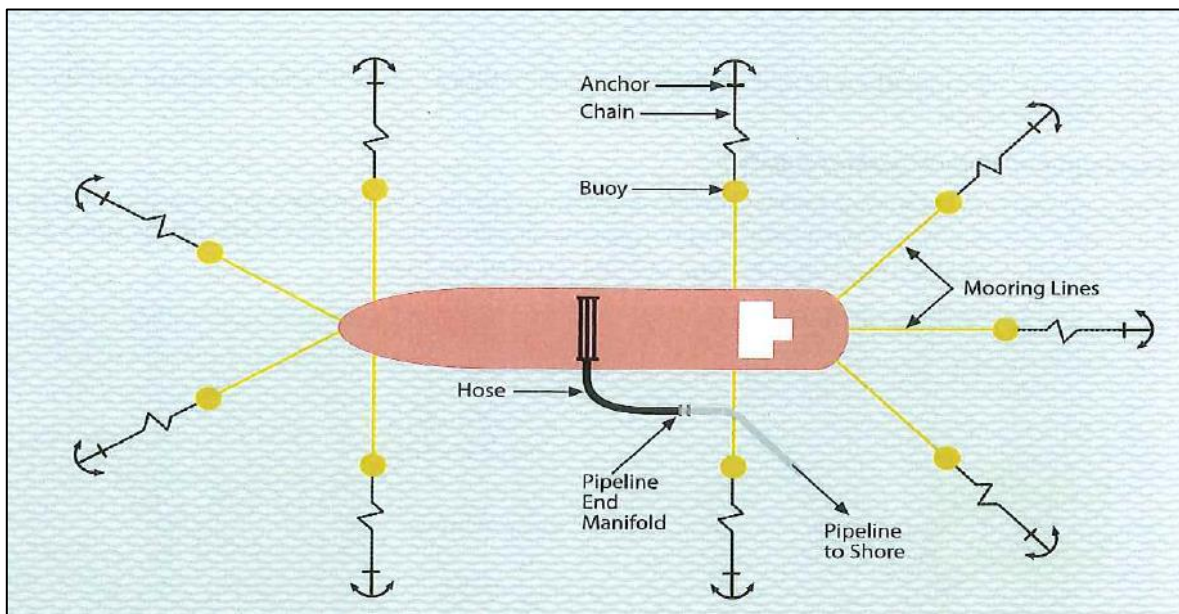
El Terminal Marítimo Multicrudos ENAP tiene 3 boyas de amarre y 2 rejeras, para naves con eslora máxima de 250 [m], las cuales transfieren combustibles livianos y pesados, gasolina, petróleo diésel y kerosene.

3.1.2 BOYAS DE AMARRE (ABMs)

Los ABMs son amarraderos marítimos costa afuera en los que tanto la proa como la popa del buque se mantienen en posición mediante boyas de amarre, como se muestra en la Figura 3.2.

Los ABMs se localizan generalmente donde las condiciones de fondo retienen el uso de las anclas del buque o donde se necesita una restricción de amarre adicional para las condiciones ambientales máximas esperadas. Las anclas del buque pueden utilizarse para maniobrar, pero no se consideran parte de la restricción de amarre requerida (OCIMF, 2010, pág. 3).

Figura 3.2. Layout todas las boyas de amarre (ABMs)



FUENTE: OCIMF (2010)

En Chile este tipo de sistema se ocupa por lo general para proyectos mineros. Un ejemplo de sistemas de amarre ABM es el Terminal Marítimo Eletroandina en Tocopilla, destinado principalmente al desembarque de graneles sólidos líquidos para naves Oil tanker de 242.8 [m] y naves Bulk Carrier de 235 [m]. El terminal cuenta con 5 boyas, las que se encuentran distribuidas en popa estribor, popa centro, popa babor, proa centro y proa babor,

respectivamente. En la parte Este del muelle, tiene instalado un sistema aéreo de cañerías para la descarga de combustible.

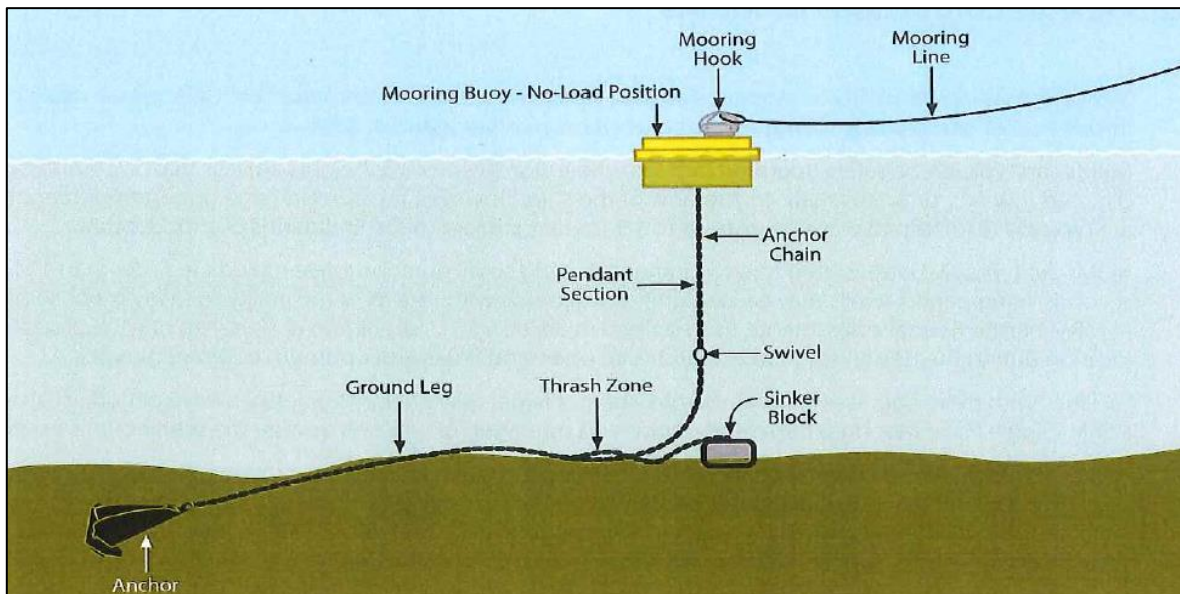
Otro ejemplo de este tipo de terminal es el Terminal Marítimo Minera Patache, el cual consiste en un muelle mecanizado destinado para la operación de naves Bulk Carrier de 230 [m] de eslora. Cuenta con dos correas transportadoras, una para embarque de sal y la otra para descarga de carbón. La instalación portuaria cuenta con un sistema de amarre de seis boyas, un cabezo con una plataforma de servicio, unida a tierra a través de un puente de acceso y dos duques de alba.

3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE AMARRE

Según OCIMF (2010, pág.4) los componentes del sistema de amarre tanto para CBM como para ABM consisten en puntos de anclaje, patas de cadena a tierra, cadena en la zona de thrash, una sección colgante que incorpora un eslabón giratorio y una boya de amarre a la que puede acoplarse la línea de amarre del buque.

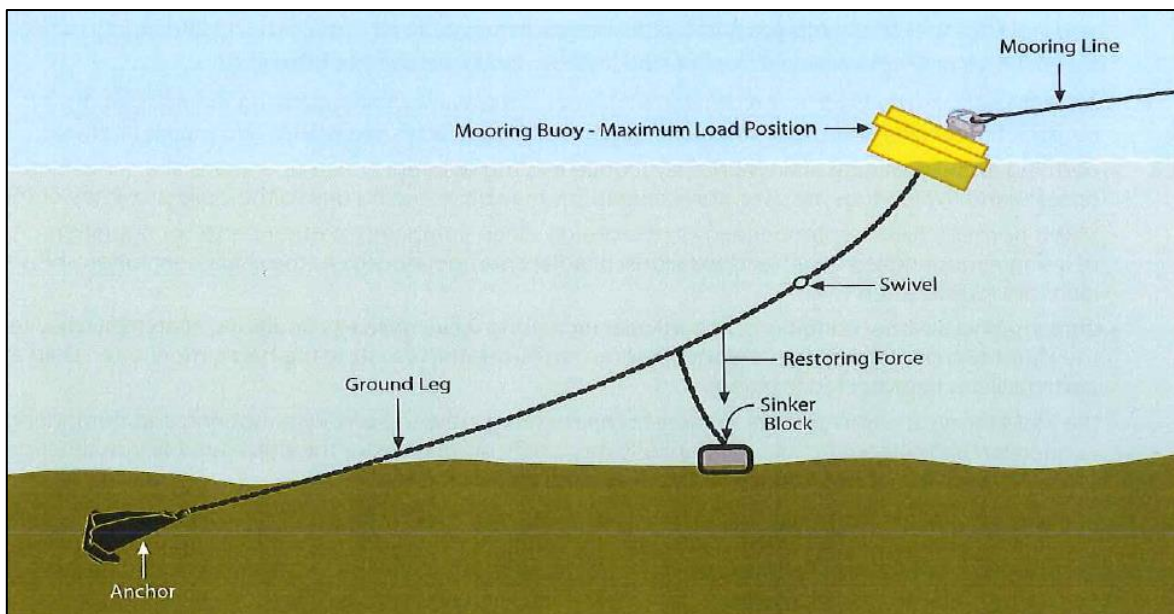
A continuación, se muestran los componentes típicos de patas de amarre. La Figura 3.3 muestra los componentes del sistema sin carga y la Figura 3.4 muestra los componentes del sistema bajo carga máxima.

Figura 3.3. Componentes típicos del sistema de fijación de amarre sin carga



FUENTE: OCIMF (2010)

Figura 3.4. Componentes típicos del sistema de fijación de amarre bajo máxima carga



FUENTE: OCIMF (2010). NOTA: FUERZA DE RESTAURACIÓN = PESO DE LA CADENA LEVANTADA DEL LECHO MARINO + (SI CORRESPONDE) RESISTENCIA DEL MUERTO DE HORMIGÓN

Según OCIMF (2010) hay cuatro tipos de anclaje, los cuales incluyen:

- Ancla de arrastre
- Ancla de placa
- Ancla de gravedad
- Pila

En la Tabla 3.1 se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de anclajes que se utilizan para los sistemas de amarre de boyas.

Tabla 3.1. Resumen ventajas y desventajas de tipos de anclajes

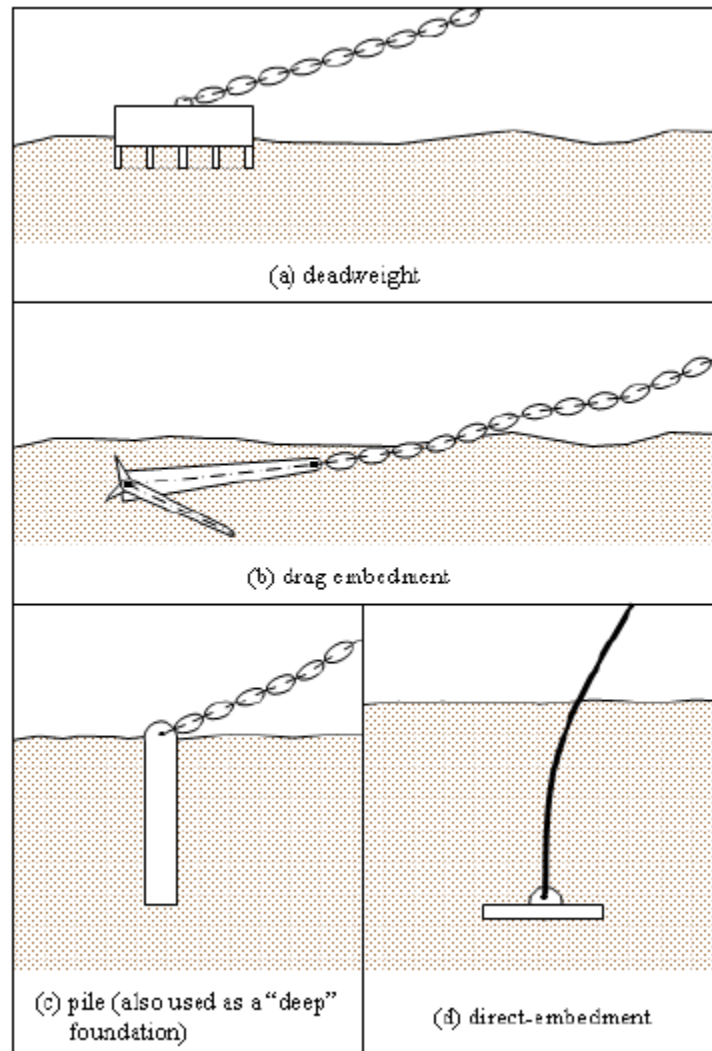
Tipo de anclaje	Ventajas	Desventajas
Ancla de empotramiento de arrastre	<ul style="list-style-type: none"> • Poder de retención altamente alcanzable • Ofrece continua resistencia a las fuerzas, incluso si la capacidad máxima es excedida. • Este anclaje es recomendable • Rango de tipos y tamaños disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> • No capaz de sostener cargas de levante • Puede no funcionar en fondos marinos duros • Comportamiento errático en capas de fondo marino
Ancla de placa	<ul style="list-style-type: none"> • Alto poder de retención 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede requerir especialistas en

	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuado para condiciones de suelo blando • Se puede instalar para resistir grandes cargas laterales o levante • Diseños y tipos patentados para adaptarse a aplicaciones específicas. 	<p>equipamiento para la instalación</p> <ul style="list-style-type: none"> • No funciona en fondos marinos duros
Ancla de gravedad	<ul style="list-style-type: none"> • Amplia reacción a la componente vertical • Fuerza de sujeción confiable relacionada a la masa del anclaje • Construcción económica y posible en el sitio • Confiable en la capa delgada de sedimentos sobre roca • Fácil de inspeccionar la conexión con la cadena 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia lateral es relativamente baja • El peso muerto puede poseer una indeseable obstrucción en el fondo marino • Puede requerir una amplia capacidad de levante de los equipos de colocación
Ancla de pila	<ul style="list-style-type: none"> • Poder de retención altamente alcanzable • Anclaje resiste cargas laterales y de levante • El anclaje no sobresale sobre el fondo marino • Colocación precisa • Pueden ser introducidos en fondos marinos estratificados o perforados en roca o coral 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativamente caro de instalar • Requiere equipo especialista para instalar o remover

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE OCIMF (2010)

La Figura 3.5 muestra los tipos de anclaje simplificados esquemáticamente.

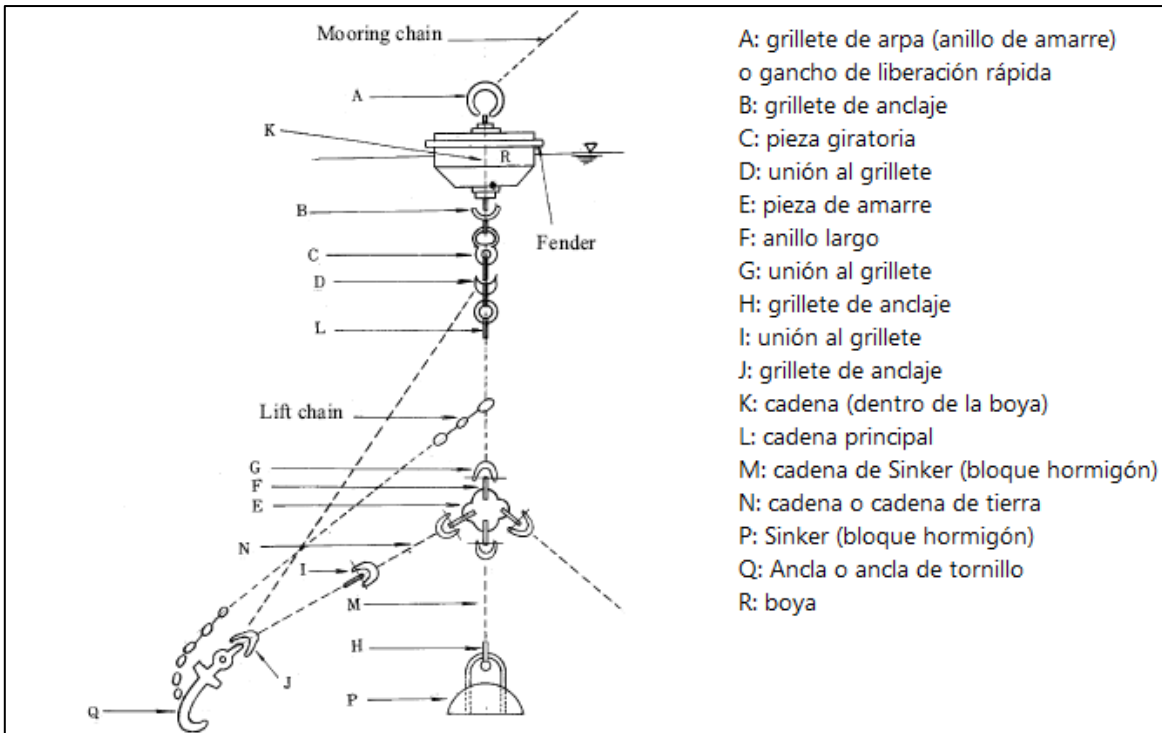
Figura 3.5. Tipos de anclaje simplificados



FUENTE: NAVFAC (2012)

La Figura 3.6 muestra los componentes típicos de una boya de amarre.

Figura 3.6. Componentes de una boya de amarre



FUENTE: OCDI (2002)

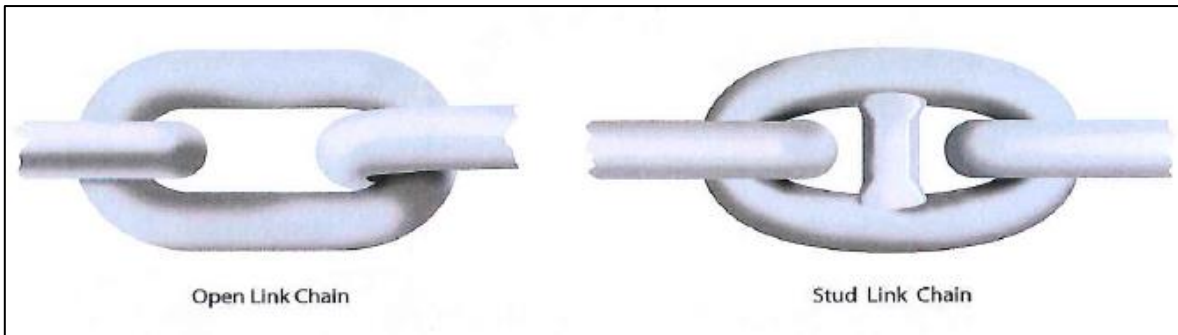
3.3 DISEÑO DE PARTES INDIVIDUALES DE BOYAS DE AMARRE

3.3.1 CADENAS DE ANCLAJE

Las cadenas pueden ser fabricadas ya sea open link (enlace abierto) o stud link (conocido como mallete). La cadena de amarre para sistemas MBM es típicamente el stud link. La cadena stud link es aproximadamente 9% más pesada que la cadena open link y tiene más resistencia a retorcerse y anudarse durante la instalación y operación. Por esta razón, es recomendado para terminales multiboya (OCIMF, 2010).

La Figura 3.7 muestra las cadenas tipo Open y stud link.

Figura 3.7. Cadenas de fondeo

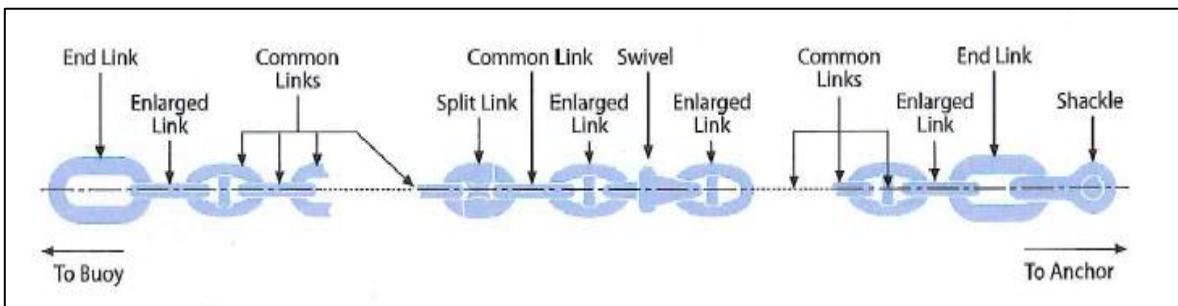


FUENTE: OCIMF (2010)

Según OCIMF (2010), la conexión de grilletes como grillete 'D', son usados entre largos estándar de 27.5 metros, comúnmente referidos como 'paño' de cadena. La conexión de enlaces debería ser más fuerte que la cadena sola.

La Figura 3.8 muestra un ejemplo de arreglo de tipos de cadena para anclaje.

Figura 3.8. Ejemplo de arreglos de cadena



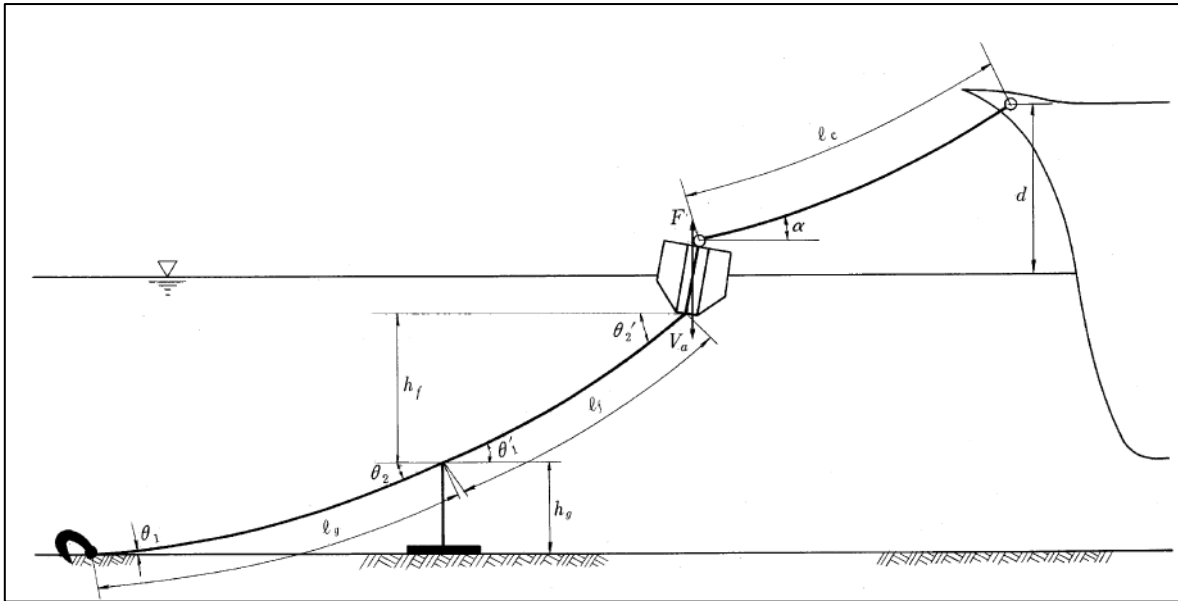
FUENTE: OCIMF (2010)

CADENAS DE ANCLAJE A TIERRA

Según OCDI (2002, pág. 505) el ángulo que la cadena forma con el fondo del mar en el punto de anclaje debe ser menor de 3° , porque la potencia de sujeción del ancla cae bruscamente a medida que el ángulo aumenta más allá de 3° en condición de máxima carga.

La Figura 3.9 muestra los ángulos que se forman entre un muerto de fijación y la boya de amarre.

Figura 3.9. Notación para muerto y cadena del ancla para boyas de amarre



FUENTE: FUENTE: OCDI (2002)

El ángulo de inclinación θ_1 y θ_2 de la cadena a tierra en el punto de anclaje puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$l_g = \frac{P}{W} (\tan\theta_2 - \tan\theta_1)$$

$$h_g = \frac{P}{W} (\sec\theta_2 - \sec\theta_1)$$

Donde:

l_g : Longitud de la cadena de tierra (m)

h_g : Distancia vertical entre el extremo superior de la cadena de tierra y el fondo del mar (decir, la suma de la longitud de la cadena del muerto, altura del muerto y margen de tolerancia (m).

P : Componente horizontal de la fuerza de tracción que actúa sobre el cuerpo flotante (kN)

W : Peso sumergido de la cadena de tierra por unidad de longitud (kN/m)

θ_2 : Ángulo de inclinación de la cadena de tierra en el extremo superior de la cadena ($^\circ$)

En este cálculo, el valor de θ_1 debería calcularse asumiendo los valores de l_g , W y h_g ; θ_1 debería ser mantenido a 3° o menos.

La tensión máxima T de la cadena de tierra debe calcularse usando la siguiente ecuación, suponiendo que la cadena forma una línea de catenaria, la tensión máxima que actúa sobre la cadena viene dada por:

$$T = P \sec\theta_2$$

Aquí P representa el componente horizontal de la fuerza de tracción del buque que actúa sobre la boya, y Θ_2 representa la inclinación de la cadena de tierra en el extremo superior. El diámetro de la cadena debe ser suficiente para soportar esta tensión.

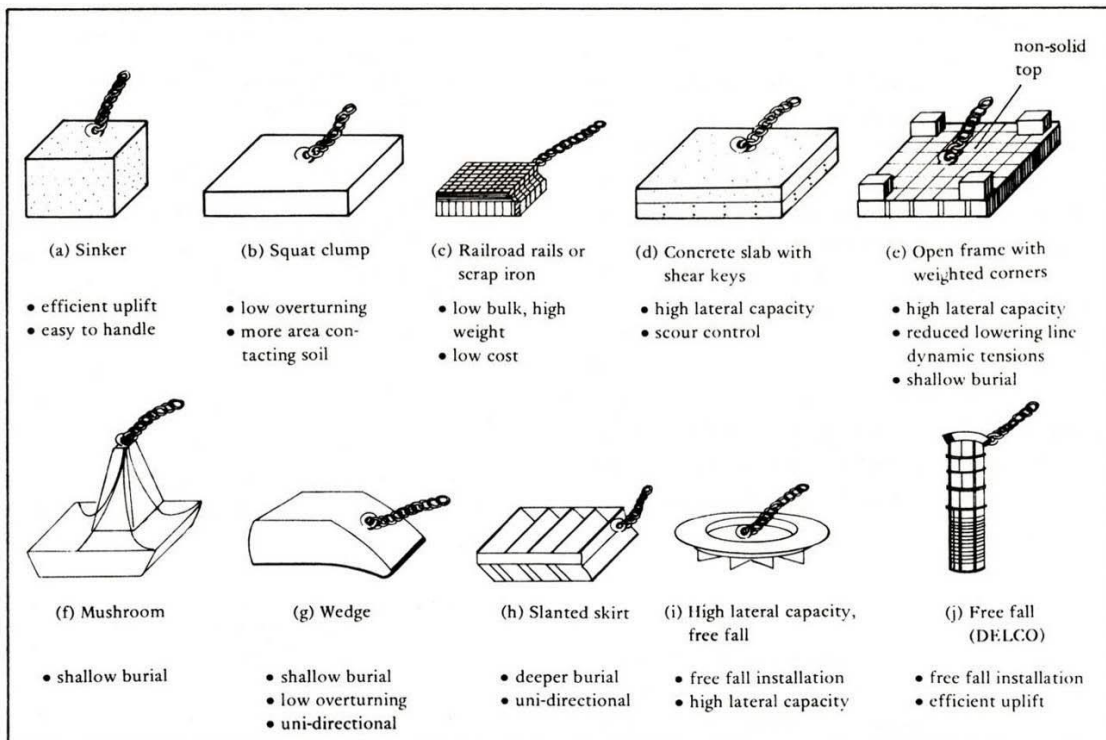
3.3.2 ANCLAJES DE PESO MUERTO (SINKER)

El anclaje de peso muerto, usualmente hecho de hormigón, se utiliza para asegurar la carga horizontal en el ancla y para absorber energía. Las dimensiones del lastre dependen del peso deseado. Se coloca una barra de acero (horquilla) en el muerto para permitir la conexión a una cadena de amarre (NAVFAC, 1985, pág. 30)

Según OCIMF (2010) un bloque de hormigón o grupo que puede estar conectado a la cadena del ancla en un punto intermedio entre la boya y el anclaje. El objetivo es proporcionar peso adicional y, por tanto, fuerza de restauración, a la pata de anclaje.

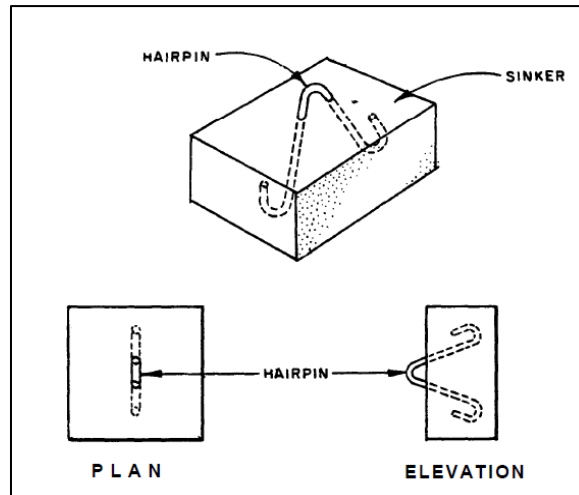
La Figura 3.10 muestra tipos de anclaje por peso muerto y la Figura 3.11 muestra un bloque de hormigón con barra de acero para conexión con la cadena de amarre.

Figura 3.10. Tipos de anclaje por peso muerto



FUENTE: OWET (2009)

Figura 3.11. Bloque de hormigón con barra de acero



FUENTE: FLEET MOORINGS (1985)

De acuerdo a OCDI (2002) las fuerzas verticales y horizontales que actúan sobre el anclaje de peso muerto deben calcularse en función de la tensión de la cadena del cuerpo flotante y la distancia del movimiento horizontal del cuerpo flotante según lo calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_v = T_a \sin\theta_1 = (T_c - Wl)\sin\theta_1$$

$$P_h = T_a \cos\theta_1 = (T_c - Wl)\cos\theta_1$$

Dónde:

P_v, P_h : Fuerzas verticales y horizontales que actúan sobre el anclaje de peso muerto, respectivamente (kN)

θ_1 : Ángulo que la cadena principal forma con el plano horizontal en el punto de unión del muerto ($^\circ$)

T_a : Tensión de la cadena principal en el punto de unión del muerto (kN)

T_c : Tensión de la cadena principal en el punto de fijación del cuerpo flotante (kN)

W : Peso sumergido de la cadena principal por unidad de longitud (t/m)

l : Longitud de la cadena principal (m)

El ángulo θ_1 se obtiene al resolver las siguientes ecuaciones:

$$l = \frac{T_a \cos\theta_1}{W} (\tan\theta_2 - \tan\theta_1)$$

$$\Delta K = \frac{T_a \cos\theta_1}{W} (\sinh^{-1}(\tan\theta_2) - \sinh^{-1}(\tan\theta_1))$$

Dónde:

K : Distancia del movimiento horizontal del cuerpo flotante (m)

θ_2 : Ángulo que hace la cadena principal con el plano horizontal en el punto de unión del cuerpo flotante ($^\circ$)

Cuando se aplica una fuerza de tracción igual a la fuerza de diseño, la alineación de la cadena del cuerpo flotante se convierte aproximadamente una línea recta y, por lo tanto, se puede usar la siguiente aproximación:

$$\theta_2 = \theta_1 = \cosh^{-1} \frac{\Delta K}{l}$$

3.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE AMARRE

Según OCIMF (2010) hay dos formas para evaluar el arreglo de un sistema de amarre multiboya: un análisis cuasi estático y el análisis dinámico. El análisis cuasi estático puede ser usado como una aproximación inicial, pero el diseño de las cargas debería ser normalmente calculado usando un análisis dinámico mediante software.

BS 6349-6 (1999) indica que las tensiones de la línea de amarre deben ser calculadas teniendo en cuenta las fuerzas en el buque amarrado y los movimientos del buque. Los tres métodos principales para evaluar las tensiones de línea son el "análisis cuasi-estático", el "análisis de frecuencia de dominio" y el "análisis de dominio de tiempo". Esencialmente, difieren sólo en el método por el cual los movimientos del buque están permitidos en el análisis.

Análisis cuasi-estático: Este tipo de estudio, en general es suficiente para la mayoría de los proyectos que involucran la implementación de boyas de amarre.

Este análisis no involucra efectos de segundo orden debido a ondas de gran amplitud u oscilaciones de la propia nave que induzcan un aumento en el tirón.

Análisis de frecuencia de dominio: Cuando los efectos de primer y segundo orden son importantes, la respuesta a olas regulares o irregulares, combinadas con fuerzas constantes debido al viento, corrientes y las olas, puede determinarse, suponiendo que las características de carga/deformación del elemento de amarre resistente, son lineales para el rango de movimientos previstos. El método se basa en el análisis de respuesta de la frecuencia estándar para un sistema de varios grados de libertad. Tiene la desventaja de necesitar de muchos recursos computacionales pues considera análisis de oleaje mediante teoría de difracción.

Análisis de dominio de tiempo: Se considera cuando los efectos de primer y segundo orden son importantes y la linealidad del diseño del punto de amarre (boya, poste, etc.) no está asegurada. Debido a que este tipo de análisis se fundamenta en la teoría de oleaje de difracción requiere de grandes recursos computacionales.

La sección 2.4 de BS 6349-6 (1999) explica en detalle los efectos de primer y segundo orden.

En el presente proyecto de título se utilizó el método cuasi-estático para definir las cargas sobre el buque y los elementos de amarre. Este procedimiento se explica en detalle en la metodología del cálculo de fondeo en la sección 4.4.

3.5 SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CARGA

El sistema de transferencia de carga en la mayoría de los casos consiste en uno o más oleoductos submarinos que se extienden entre la costa y el terminal multiboya. Las operaciones de carga y descarga de los buques tanque se llevan a cabo utilizando manguera flexibles que están conectadas entre el colector extremo de la tubería y el manifold del buque (OCIMF, 2010, pág. 4).

A continuación se describen los elementos del sistema de transferencia de combustible.

3.5.1 CAÑERÍAS SUBMARINAS

“Una cañería submarina es todo sistema de tuberías o parte de esta la cual se encuentra sumergida en agua. El término generalmente, se refiere a todo tipo de tuberías incluyendo las de transporte de petróleo, gas natural, productos industriales” (DOP, 2013).

El Decreto 160 (2009) define oleoducto como un conjunto de tuberías, válvulas, bridas (flanges), conexiones, dispositivos de control y de seguridad, filtros y equipos necesarios para el transporte de combustibles líquidos entre dos instalaciones, como asimismo para el trasegamiento de combustibles líquidos entre el extremo de la tubería submarina ubicada en tierra y la instalación respectiva. Las tuberías con que se construya el oleoducto deberán ser de acero soldable del tipo sin costura o soldadas por resistencia eléctrica o por arco sumergido. (Decreto 160, 2009).

El proceso sin costuras, también llamada fabricación sin soldadura es una técnica de trabajo en caliente (1200°C app.) para formar un producto tubular sin una costura soldada. La principal ventaja de este método es que la cañería logra una mayor contención de la presión, gracias a su homogeneidad en todas sus direcciones.

El artículo 127º de Decreto 160 (2009) recomienda que las tuberías y elementos de la red de cañerías deben ser protegidos contra la corrosión externa, ya sea a través de un recubrimiento con materiales resistentes a la corrosión, y/o mediante un sistema de protección catódica diseñado, de acuerdo a la norma NACE Standard RP0169-2002. "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping System".

La Figura 3.12 muestra tuberías de acero sin costura.

Figura 3.12. Tuberías de acero sin costura



FUENTE: CATÁLOGO DE PRODUCTOS MULTIACEROS

3.5.2 MANGUERAS FLEXIBLES

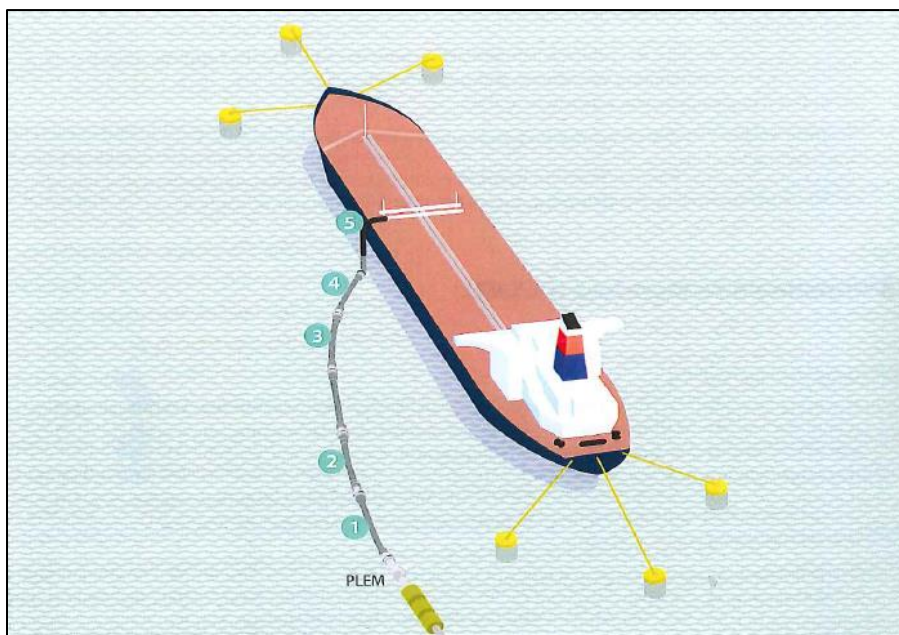
Según Almazán et.al (2000) existen dos tipos de mangueras en este tipo de instalaciones: unas fijas y otras desmontables.

En el caso de las mangueras fijas están siempre unidas al extremo del PLEM (Pipe Line End Manifold) y su otro extremo se une a un boyarín en el caso de campo de boyas o la monoboya en sí misma. Las mangueras fijas permanecen siempre sumergidas, siendo en el momento de la carga o la descarga del buque cuando se conectan al manifold del buque tanque.

Las mangueras fijas sumergidas están constituidas por elementos plásticos y metálicos flexibles que tienen la doble función de resistir los esfuerzos y de ser impermeables.

La configuración del flexible desde el PLEM al buque tanque generalmente estará compuesta por los tipos de manguera representados en la Figura 3.13 y la Tabla 3.2.

Figura 3.13. Ejemplo de configuración de flexibles en un sistema de amarre multiboya



FUENTE: OCIMF (2010)

Tabla 3.2. Ejemplo de configuración de flexibles para sistemas de amarre multiboya

No	Nombre común	Tipo	Características	Uso
1	Conexión PLEM	Submarino	En el extremo reforzado	Conexión a tuberías rígidas en PLEM
2	Mainline	Submarino	Flotabilidad neutral o reducida	Componente principal del flexible
3	Taper	Submarino	Agujero de reducción integral	Conecta la mayor parte del diámetro interior a una manguera inferior de diámetro interior
4	Tail Hose	Submarino	Electricidad discontinua	Diámetro más pequeño que la línea principal para manejar el flexible del carril en el

				extremo del petrolero
5	Rail hose	Submarino	Mayor flexibilidad con el tirón de elevación	Sobre la manguera del carril para la conexión del centro manifold

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE OCIMF (2010).

En los terminales multiboya, los flexibles se pueden conectar al manifold del buque tanque utilizando una conexión atornillada manualmente o un acoplamiento de conexión/desconexión rápida [QC/DC] (quick-connect/disconnect), como una cámara de dispositivo de bloqueo. La Figura 3.14 muestra este tipo de conexión.

Figura 3.14. Conexión manifold con mangueras flexibles



FUENTE: OCIMF (2010)

Por otra parte, las mangueras desmontables son las que unen la monoboya o el extremo superior de las mangueras sumergidas con el buque. Estas mangueras además de las funciones de resistencia a los esfuerzos e impermeabilidad tienen que ser flotantes. Estas mangueras flotantes se montan y desmontan por tramos en cada operación de carga o descarga.

El aspecto de estas mangueras flotantes desmontables en el caso de una monoboya se muestra en la Figura 3.15.

Figura 3.15. Manguera desmontable para el caso de una monoboya



Almazán et.al (2000)

3.6 PIPELINE END MANIFOLD (PLEM)

El PLEM consta de una base estructural que soporta el manifold de la tubería y facilita las terminaciones submarinas de línea de tubería y la conexión con los flexibles. Las dimensiones típicas de un PLEM tienen rangos entre 2 por 5 metros a 8 por 10 metros. El diseño del PLEM debería ser compatible con el tamaño de las tuberías, clase de tuberías y la configuración de flexibles.

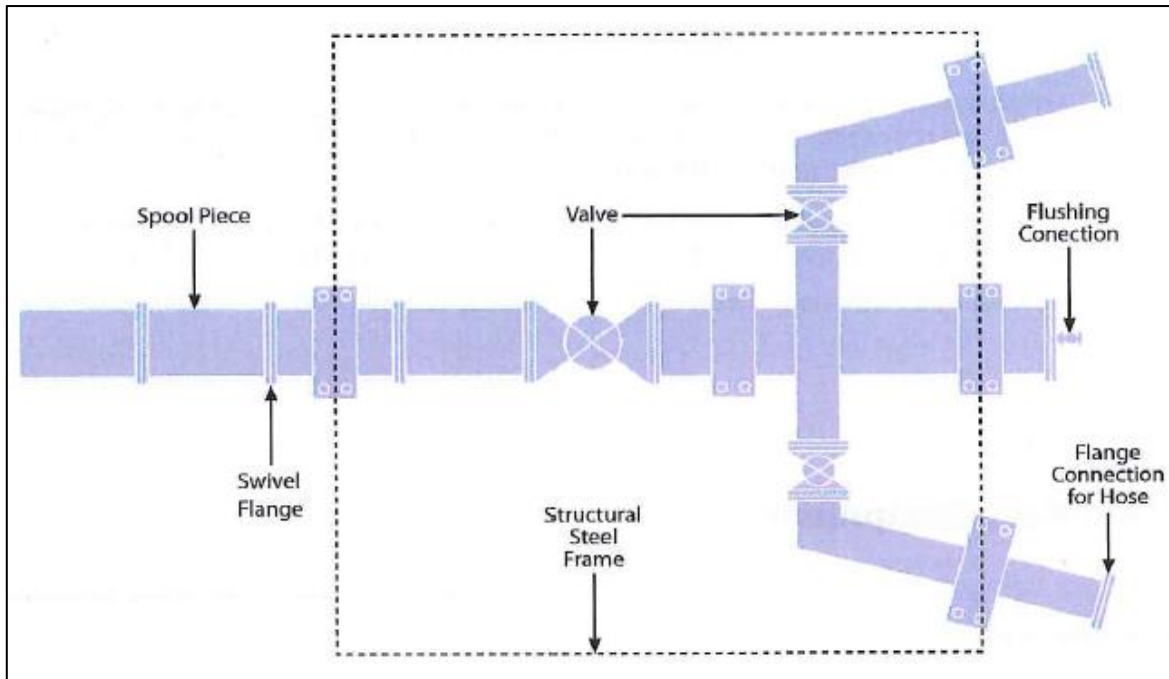
En su forma más simple, el PLEM puede consistir en una válvula, preferentemente una válvula de bola, una pieza de carretilla que incorpora un punto de inyección de agua y un flange de conexión para el flexible.

El PLEM debe estar ubicado de forma tal que los flexibles se desplieguen y se mantengan completamente fuera del contorno del casco del tanque cuando no estén en uso.

Para condiciones suaves, puede ser aceptable anclar la tubería con bloques de concreto. La tubería PLEM debe incluir válvulas para facilitar el reemplazo de las mangueras submarinas y puede estar configurada para la conexión de un receptor/lanzador de pigging para facilitar el bombeo de la tubería (OCIMF, 2010).

La Figura 3.16 muestra un layout simplificado para tubería PLEM.

Figura 3.16 . Layout simplificado para tubería PLEM



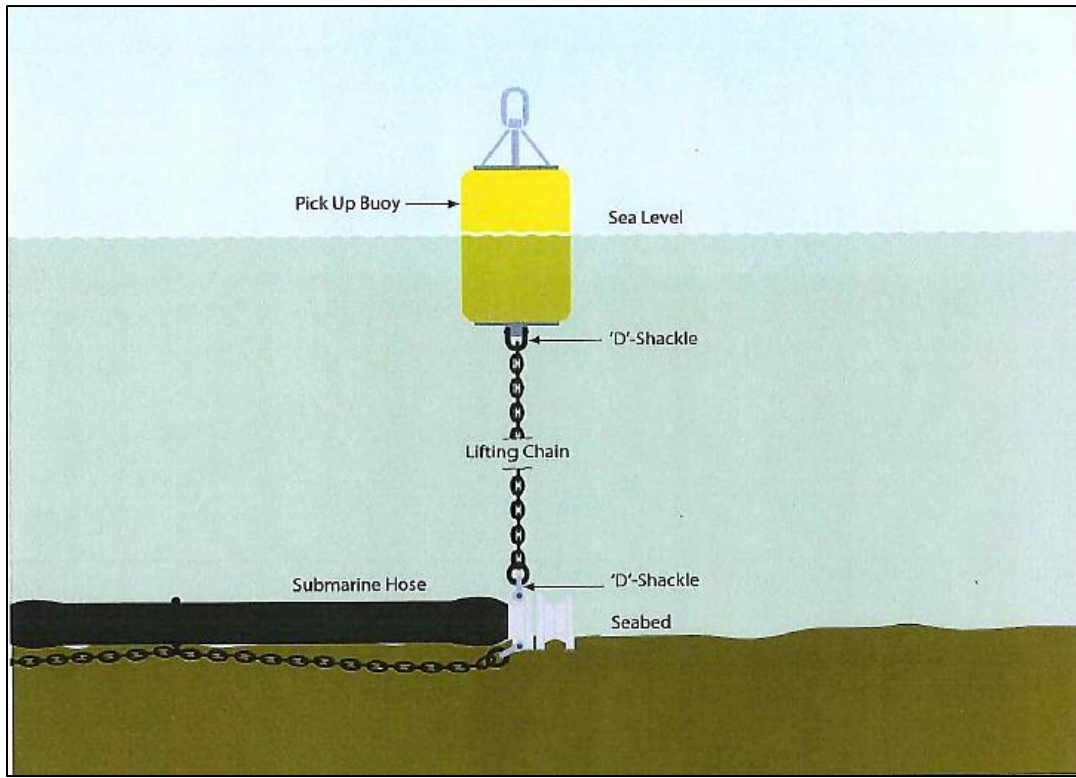
FUENTE: OCIMF (2010)

3.7 BOYARÍN DE LEVANTE

Según OCIMF (2010), los boyarines de levante son boyas que están unidas al extremo de una manguera submarina por medio de cadenas. El boyarín de levante se iza a bordo del buque tanque cuando la manguera se eleva con el mecanismo de elevación del buque. Estos deberían ser atados al término de los flexibles por cadenas. Los anillos conectores que se atan a los flexibles deben colocarse cada 4.5 a 6 metros a lo largo de la cadena para levantar la manguera. Para facilitar el manejo a bordo del buque, normalmente se usan boyas pequeñas.

La Figura 3.17 muestra un boyarín de levante típico con conexión al flexible.

Figura 3.17. Boyarín de levante típico con conexión al flexible



FUENTE: OCIMF (2010)

4 METODOLOGÍA

4.1 ESTUDIO DE CONDICIONES NATURALES DEL SECTOR

4.1.1 ESTUDIO DE OLAJE

4.1.1.1 BASE DE DATOS DE OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS

El análisis de las condiciones de incidencia local del swell en el sector bajo estudio, se basa en el uso de una serie de 35 años (1980 al 2015) de parámetros espectrales de oleaje altura significativa H_s [m], periodo peak T_p [s] y dirección media [°]. La serie de tiempo fue obtenida del hindcast de oleaje del proyecto Fondef-Idea IT13I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile mediante el modelo Wavewatch III v.4.18, calibrado a partir de mediciones de altimetría satelital y de boyas (Beyá y otros, 2016). La información utilizada corresponde a datos de oleaje definidos en su condición de aguas profundas a una profundidad de -4404 [m] y son presentados cada 3 horas. Se utilizó para este propósito el nodo N10 localidad Talcahuano que se encuentra ubicado en las afueras de la bahía de Escuadrones en la latitud -37° y longitud -75° .

En la Figura 4.1 se presenta la ubicación del Nodo N10 Talcahuano.

Figura 4.1. Ubicación nodo N10 Talcahuano



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE GOOGLE EARTH

4.1.1.2 PROPAGACIÓN DE OLEAJE AL SITIO DE INTERÉS

Para realizar un análisis del oleaje en el sitio de interés, se utilizó el modelo de tercera generación SWAN (Simulating Waves Nearshore). Para esto se realizaron las siguientes etapas:

i. Obtención de la información batimétrica del sector de estudio:

Utilizando la información batimétrica disponible de las cartas náuticas digitales del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), se generó una malla de cálculo que tiene como objetivo la obtención de toda la información batimétrica que se requiera para ser utilizada en los modelos de propagación de oleaje espectral SWAN hacia el sitio de emplazamiento de obras. Para este análisis se confeccionó un mallado que contiene información de los veriles, sondajes y línea de costa de la zona de interés ubicada en la bahía de Escuadrones, en la VIII región. La información de la batimetría se obtuvo a través de las cartas náuticas de la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Cartas náuticas del SHOA

1	CL2BB060
2	CL4BB010
3	CL5BB025

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El procedimiento que se realizó para obtener un mallado de fondo con información disponible de las cartas náuticas digitales del SHOA, el cual incluye los siguientes softwares: Global Mapper, Surfer, Matlab.

ii. Especificaciones de las mallas numéricas:

Se ha considerado la utilización de un modelo de malla gruesa de 500x500 [m], un anidado intermedio de 200x200 [m] y un anidado de malla fina de 50x50 [m] de resolución.

Los detalles de resolución espacial, para los cuales se obtuvo los resultados en la propagación y representación de los fenómenos de transformación del oleaje, se presentan en la Tabla 4.2.

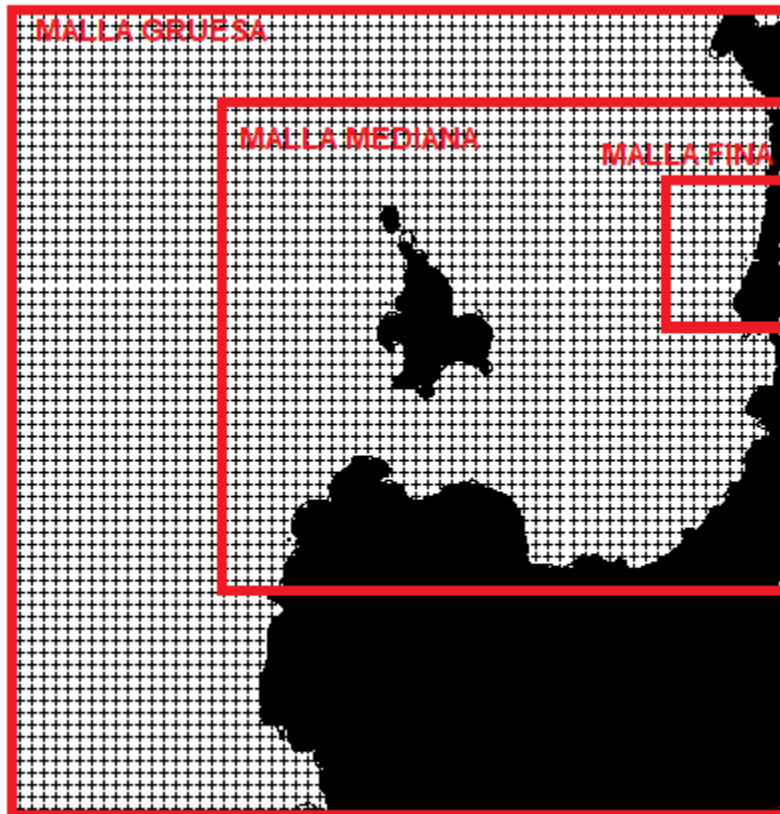
Tabla 4.2. Especificaciones de mallas numéricas utilizadas para propagación de oleaje

Malla	Coordenadas				Extensión		Resolución Espacial	
	Inicial		Final		Este-Oeste [m]	Norte-Sur [m]	ΔX [m]	ΔY [m]
	Oeste [m]	Norte [m]	Oeste [m]	Norte [m]				
Gruesa	581600	581600	668600	5947000	75000	76000	500	500
Media	612100	5874800	665900	5920000	53800	45200	200	200
Fina	653300	5899650	664900	5914300	11600	14650	50	50

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La Figura 4.2 muestra la extensión de las mallas numéricas gruesa, mediana y fina.

Figura 4.2. Extensión mallas numéricas



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

iii. Definición de coordenadas para el nodo de análisis:

Se definió un nodo ubicado en zona de fondeo del buque tanque. Las coordenadas del nodo definido seleccionado en UTM son las que se indican a continuación:

- Oeste [m]:659950
- Norte [m]:5906100
- Profundidad: 30 [m]

iv. Metodología de propagación de oleaje:

Se empleó la metodología denominada “propagación de alturas unitarias”. Esta se basa en la utilización de condiciones de borde en aguas profundas, definidas por un espectro sintético tipo JONSWAP modulado por parámetros de altura significativa $H_s=1$ [m] y distintos períodos y direcciones hasta las coordenadas del nodo de análisis.

Lo anterior permitió crear 2 matrices:

- Matriz de coeficientes de agitación (K_a), donde cada uno de estos parámetros se asocia a un periodo y dirección en particular.
- Matriz de direcciones de incidencias, asociadas al periodo y dirección de propagación desde aguas profundas.

Con dicha matriz de coeficientes es posible transferir espectralmente la totalidad de energía del oleaje hasta el sitio de interés. Esto mediante la multiplicación de la altura significativa de aguas profundas por su coeficiente de agitación, ambos datos asociados a un mismo rango de periodo peak y dirección media. Con ello se obtiene la altura de oleaje en el sitio de interés con su correspondiente periodo y dirección de incidencia.

Dicha metodología asume que la variación del periodo es ínfima por lo cual se mantiene constante.

Se realizaron propagaciones de 11 periodos característicos cada dos segundos, los cuales fueron seleccionados considerando el máximo y mínimo período pertenecientes a la estadística en aguas profundas. Estos son 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25 [s]; y nueve direcciones de oleaje representativas considerando una discretización direccional cada 22.5° las cuales son N, NNW, NW, S, SSW, W, WNW, WSW. De esta forma se realizó un total de 9 X 11 = 99 propagaciones, con las que se obtiene un total de 99 coeficientes de agitación y dirección.

Las direcciones fueron calculadas en coordenadas náuticas, las cuales se muestran en la Tabla 4.3.

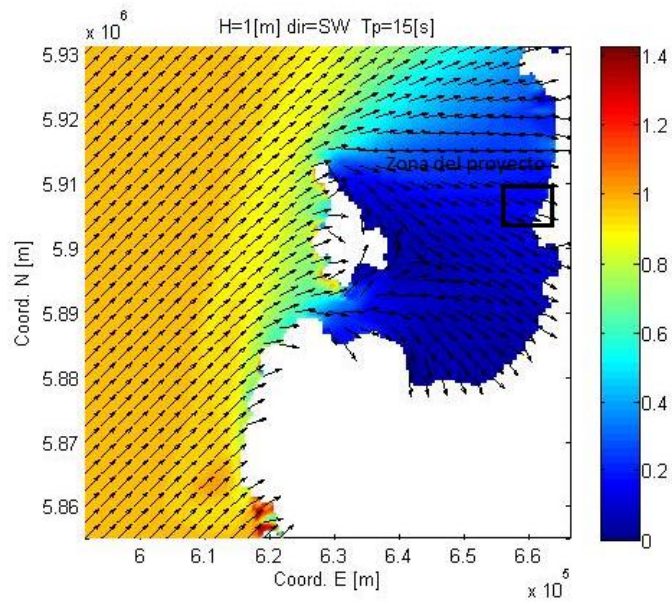
Tabla 4.3. Direcciones de oleaje incidente en coordenadas náuticas

Oleaje incidente	Ángulo geográfico
N	-90
NNW	-67.5
NW	-45
WNW	-22.5
W	0
WSW	22.5
SW	45
SSW	67.5
S	90

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

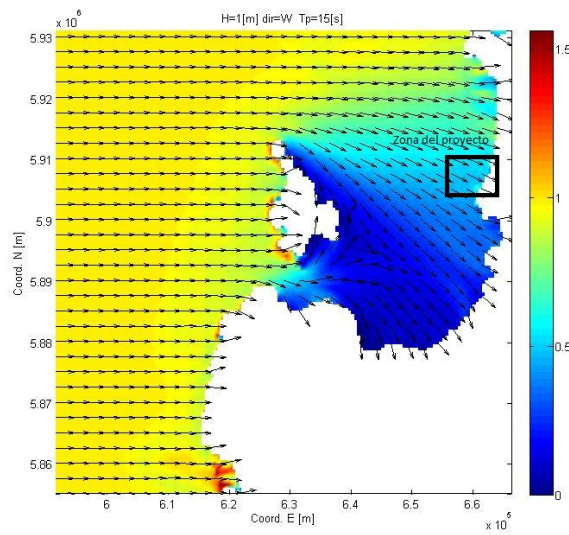
La Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5 presentan un ejemplo de las principales direcciones de propagación (SW, W, NW) con altura unitaria $H_s=1$ [m] y período característico $T_p=15$ [s].

Figura 4.3. Propagación de oleaje de altura unitaria SW y $T_p=15s$



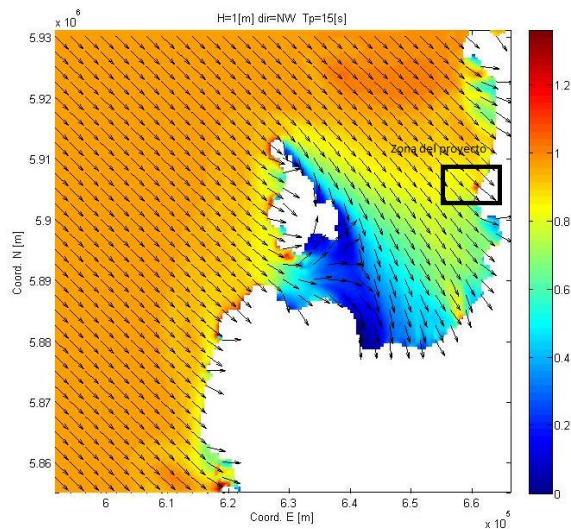
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 4.4. Propagación de oleaje de altura unitaria W y $T_p=15s$



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 4.5. Propagación de oleaje de altura unitaria NW y $T_p=15s$



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

4.1.1.3 CLIMA MEDIO EN EL SITIO DE INTERES

El análisis de clima medio de oleaje en el sitio de interés se basó en un análisis estadístico de los parámetros de altura significativa (H_s), periodo peak (T_p) y dirección media (Dir) en la data transformada. Para dichos parámetros, se efectuó un análisis en una y dos variables para el desarrollo de histogramas, tablas de incidencia y rosas de oleaje. Mediante este análisis, es posible distinguir las condiciones de incidencia más frecuentes en el sector bajo estudio.

Para el desarrollo del análisis estadístico, se consideró una discretización de rangos direccionales a intervalos de $22,5^\circ$. Se consideraron 9 direcciones principales: N, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW y NNW. Para el análisis de alturas significativas, se consideraron intervalos de 0,5 [m], y para el análisis de periodos peak, intervalos cada 2 [s].

4.1.1.4 CLIMA EXTREMO EN EL SITIO DE INTERES

El análisis de clima extremo de oleaje se realizó usando la metodología POT (valores sobre el umbral) sobre la serie de alturas significativas de la data transformada al sitio de interés. El método POT se basa en la definición de un umbral de altura, el cual se utiliza para identificar los eventos considerados como extremos.

Se definió una altura de ola con un umbral de $H_s=4.5$ [m], donde se identificaron 29 eventos extremos. Luego los máximos valores de altura significativa de cada evento extremo identificado son utilizados para verificar el ajuste de una función de densidad de probabilidad.

En el presente estudio se analizó el ajuste de las distribuciones Gumbel, Weibull (Petraukas), Weibull (Goda) y Log normal, pero en todos los casos se probó un mejor ajuste al aplicar una distribución Weibull (con diferentes parámetros de forma k).

Una vez definidas las funciones de distribución de probabilidad, se calcularon los valores de altura significativa para diferentes periodos de retorno R, hasta un máximo de 100 años. Los resultados se muestran en la sección 5.1.1.3.

4.1.2 ESTUDIO DE MAREAS Y CORRIENTES

Para los antecedentes oceanográficos de mareas y corrientes en el sector de estudio, se recopiló material del estudio realizado por PRWD (2008). Aplican al diseño del Proyecto de Ingeniería Básica “Muelle de Descarga de Carbón – Puerto Coronel”, que PRDW Aldunate Vásquez realizó para Puerto Coronel, en la bahía de Coronel, VIII Región.

4.1.3 ESTUDIO DE VIENTOS

Para realizar este estudio se obtuvo la data del año 2010 perteneciente al Explorador de Energía Eólica disponible públicamente por (FCMC, 2012), realizado a partir de simulaciones numéricas. Las simulaciones son obtenidas mediante el modelo numérico WRF (*Weather Research and Forecasting*), con alta resolución en la horizontal 1 [km] como en la vertical 10 [m].

Las coordenadas de análisis fueron tomadas en la siguiente ubicación:

- Latitud: -36.9363
- Longitud -73.264
- Altura: 5.5 [m]

4.2 DOWNTIME OPERACIONAL

Se realizó un downtime operacional para estimar el porcentaje del tiempo que el terminal marítimo se encuentra operativo. El downtime operacional es función del viento, corriente y oleaje. Se produce cuando las condiciones ambientales superan cierto límite de operatividad según el tipo de buque (oil tanker). El downtime ocurre cuando el buque no puede atracar o cuando el buque debe suspender sus operaciones o debe salir por condiciones oceanográficas inaceptables.

Consecuentemente, la cantidad de tiempo que un atraque está disponible para estas actividades sin peligro depende de la cantidad de tiempo que las condiciones meteorológicas deben mantenerse por debajo de ciertos niveles de umbral. Si el límite de condiciones es excedido, este potencial conduce a downtime al atraque.

4.2.1 DOWNTIME POR OLAJE

Para definir la altura de ola umbral de operación (altura sobre la cual no es posible efectuar las operaciones), se siguió la recomendación de Thorensen (2003) donde se recomienda operaciones de atraque y desconexión típicamente restringidas a alturas de ola entre $H_s=1.5$ a 2.5 [m] para buques tanque entre 30000 a 200000 [dwt], sujetas a las limitaciones de las embarcaciones de apoyo. Por seguridad se estimó que el umbral de operación debe ser de $H_s=1.5$ [m], por lo que el downtime operacional por oleaje se estimó como la suma de las frecuencias acumuladas de altura que superen este umbral.

4.2.2 DOWNTIME POR VIENTOS

Para la determinación del downtime operacional por viento, se utilizó la estadística del año 2010 perteneciente a FCMC (2012). Las condiciones de límite operacional en el caso de campos de boya se basó en la sección 8.8.4 de ROM 3.1-99 (2000), donde se recomienda para maniobras de aproximación y amarre una velocidad absoluta del viento de $V_{10, 1min}=10$ [m/s] (20 [Nudos]). Sin embargo, y para efectos de seguridad del terminal marítimo, se consideró una velocidad de operación de $V_{10, 1min}=7.5$ [m/s] (15 [Nudos]). Bajo este supuesto, se define el downtime operacional como la suma de frecuencias acumuladas de velocidades del viento que superen este umbral.

4.2.3 DOWNTIME POR CORRIENTES

Para la determinación del downtime operacional por corriente, se determinó como límite de operación una velocidad de corriente de 0.5 [m/s] según la sección 8.8.4 de ROM 3.1-99 (2000) para amarraderos de orientación fija (campos de boyas, etc). Sin embargo, y para efectos de seguridad del terminal marítimo, se consideró una velocidad de operación de 0.26 [m/s] o 0.5 [nudos], basado en la experiencia del Terminal Marítimo Multicrudos ENAP, el cual opera buques de 250 [m] de eslora. Bajo este supuesto, se define el downtime operacional como la suma de frecuencias acumuladas de velocidades del corrientes que superen este umbral.

4.3 PROPUESTA DE LAYOUT

Para realizar una propuesta de layout para el terminal marítimo, se propone cumplir con los siguientes requerimientos:

Definición de consideraciones preliminares de diseño:

- i. Definición de buque a ser amarrado y sus propiedades. Se definió una nave tipo para el trasvase de productos, con la cual se cuenta con todos los datos necesarios para realizar un diseño de un terminal marítimo multiboya.
- ii. Cálculo del resguardo bajo la quilla (UKC). La profundidad mínima de seguridad para fondeo del buque, se calculó en base a OCDI (2002).

Análisis de alternativas para definir el layout del terminal marítimo:

Se analizaron tres alternativas de fondeo para la nave de diseño y su orientación acorde a las condiciones ambientales y calado de la nave. El análisis metodológico se basa las siguientes etapas:

- i. Descripción de ingeniería conceptual de cada alternativa.
- ii. Identificación de las variables que inciden de alguna manera en la alternativa propuesta.

Selección de alternativa mediante una matriz multicriterio:

Se utilizó el método de las Jerarquías Analíticas o método AHP (Satty, 1977, 1980). Este método se basa en la obtención de preferencias o pesos de importancia para los criterios y las alternativas. Para ello, el decisor establece “juicios de valores” a través de la escala numérica de Saaty (del 1 al 9) comparando por parejas tanto los criterios como las alternativas.

La escala fundamental para representar las intensidades de los juicios se presenta en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Escala numérica de juicios para la toma de decisiones

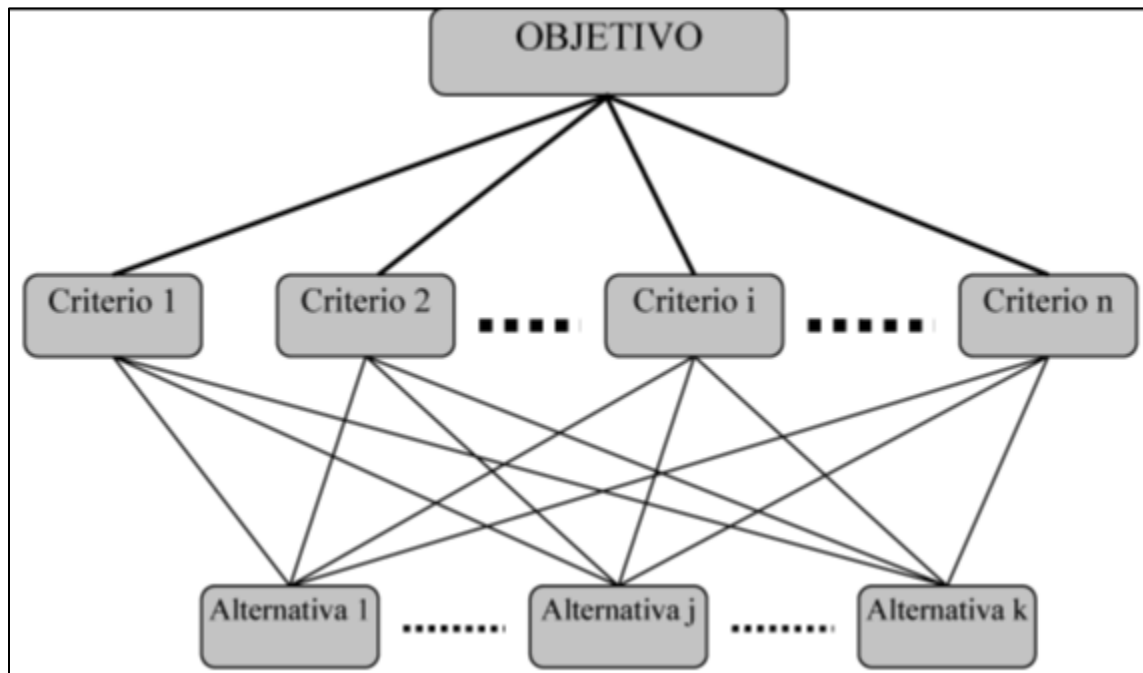
Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro,	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

FUENTE: EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP). FUNDAMENTOS, METODOLOGÍA Y APLICACIONES

Para la aplicación de este método es necesario que tanto los criterios como las alternativas se puedan estructurar de forma jerárquica.

Para el presente trabajo se analizaron tres alternativas (i, ii, iii) y cinco criterios de decisión los cuales son: costos, constructibilidad, seguridad en la operación, mantenimiento, impacto en el sitio. El primer nivel de jerarquía corresponde al propósito general del problema, el segundo a los criterios y el tercero a las alternativas, como se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Esquema del modelo jerárquico



FUENTE: PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO PAJ (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS AHP)

Configuración de las cañerías submarinas de petróleo:

Se emplazarán a una profundidad acorde al calado de las naves de diseño. El rumbo de las cañerías rígidas para transporte de productos se emplazará según el promedio direccional de olas extremas de la estadística de oleaje en el sitio del proyecto.

4.4 CÁLCULO DE FONDEO

El diseño del sistema de fondeo presentado en este informe, está basado en el siguiente criterio fundamental: El sistema de anclaje de cada boya debe resistir las máximas sollicitaciones oceanográficas del lugar, a través de las fuerzas de fricción o agarre generadas entre el fondo marino y los elementos de anclaje (cadenas y muertos) que quedan depositados o enterrados en el fondo marino.

Es importante destacar que en el procedimiento de diseño, se adoptan sistemáticamente valores conservadores, además de factores de seguridad recomendados por distintas normas internacionales en obras de este tipo.

A continuación, se detallan cada una de las etapas para realizar el cálculo de fondeo de la nave de diseño:

- i. Definición de las condiciones oceanográficas que se utilizarán como base para el cálculo de amarre de resistencia del sistema de fondeo. Estos parámetros son obtenidos mediante el estudio realizado por PRWD (2008) y las condiciones operacionales del terminal marítimo.
- ii. Cálculo de las áreas buque tanque expuestas tanto a corrientes, vientos y olas. Estas son determinadas con base a parámetros dimensionales de la nave que operará en el terminal marítimo. Se determinaron las áreas tanto en condición de lastre como de carga en el sentido longitudinal y transversal.
- iii. Cálculo de las fuerzas y momentos generados por las condiciones oceanográficas de viento, corriente y olas que actúan sobre la nave de diseño en condición de lastre y carga en base a las ecuaciones de (ROM 3.1-99, 2000). Para el caso del viento se considerarán 12 direcciones (0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180° , 210° , 240° , 270° , 300° y 330°), esto con el objetivo de reflejar los cambios de dirección súbitos, debido a rachas u otros fenómenos. Para las corrientes y oleaje se considerarán las incidencias en las direcciones predominantes.
- iv. Las fuerzas resultantes en los elementos de apoyo de las naves, tanto en las espías como en las cadenas, se determinaron mediante el software de diseño estructural SAP2000 V18, mediante una modelación de la nave tanto en carga como en lastre.
La nave se modela como un elemento infinitamente rígido, mientras que los elementos de amarre son modelados como elementos cable; resistiendo sólo fuerzas positivas de tracción.

Los esfuerzos en cada elemento de amarre son obtenidos por una envolvente generada mediante 48 combinaciones de carga, presentadas en la Tabla 4.6. Las fuerzas de diseño corresponden a las máximas fuerzas en los elementos de fondeo, considerando las nave en laste y carga.

4.5 SISTEMA DE FIJACIÓN CAÑERÍAS SUBMARINAS

- i. Definición de las características de las cañerías submarinas: Se definió el diámetro y peso por unidad de metro. Para de las cañerías de acero se ocupó Schedule 40 ASTMA según artículo 211 letra a del Decreto 160 (2009).
- ii. Elección del tipo de muerto de hormigón: Se escogió un muerto tipo tronco piramidal para resistir las fuerzas oceanográficas a lo largo de la cañería submarina debido a su buena estabilidad y capacidad de agarre al fondo marino. Este muerto se dimensionó acorde al diámetro de la cañería.
- iii. Cálculo de fuerzas ejercidas sobre las cañerías, en base a los parámetros obtenidos en el análisis oceanográfico del sector de estudio. Para esto se obtuvieron de los siguientes parámetros para un período de retorno de 100 años en base al análisis de clima extremo de oleaje:
 - H_o : Altura de ola en el sitio de interés (30 [m] profundidad)
 - L_o : Longitud de ola asociado al período peak característico del sector de estudio
 - α_o : Ángulo de incidencia de la ola
 - Propagación del oleaje a lo largo de la cañería mediante TLO (Teoría lineal del oleaje)
 - u : Velocidad orbital de ola (horizontal),
 - du/dt : Aceleración horizontal orbital de la ola
 - U : Velocidad de corriente (Estudio PRDW (2008))
 - β : Ángulo de incidencia de la corriente sobre las cañerías

Las fuerzas hidrodinámicas en las cañerías de arrastre e inercia fueron evaluadas mediante las formulaciones propuestas por Morison et al. (1950).

- iv. Cálculo de las siguientes fuerzas ejercidas sobre la cañería, en base a los parámetros obtenidos en el análisis oceanográfico.
 - Fuerzas de peso propio
 - Fuerzas hidrostáticas
 - Fuerzas hidrodinámicas (oleaje y corrientes)
- v. Cálculo de la separación máxima entre muertos, mediante sumatoria de fuerzas.
- vi. Dimensionamiento de los muertos de término tipo montura en función de diámetro de cañería y tensión de rotura de válvula Break Away.
- vii. Definición del número de muertos de término. Acá se asegura que el sistema sea capaz de permitir el correcto funcionamiento de la válvula Break Away, resguardando en todos los casos la integridad de la cañería.

4.6 SISTEMA DE CAÑERÍAS FLEXIBLES:

Se seleccionó el tipo flexible según el catálogo Offshore Hose Manual (OCIMF), acorde a las características del terminal marítimo, en este caso un sistema de amarre convencional (CBM).

Para determinar el número de flexibles, el análisis se basó según la fórmula propuesta por OCIMF (2010), mediante los siguientes factores que deben ser considerados cuando se determina la longitud de los flexibles:

- Profundidad del agua
- Máxima variación de marea
- Francobordo del buque más grande en su estado de funcionamiento más ligero
- Movimientos del buque en el amarradero

Un método aproximado para calcular el largo de los flexibles en sistemas de amarre multiboya es la siguiente:

$$T_L := L_1 + D_{\max} + F_{\max} + M_h + D_m + \sqrt{(FA_{\max})^2 + (SW_{\max})^2}$$

Donde:

TL=Largo total requerido

L1=Distancia entre PLEM y casco del buque

Dmax=Profundidad máxima

Fmax=Franco bordo máximo

Mh=Altura manifold del buque

Dm=Distancia casco al manifold

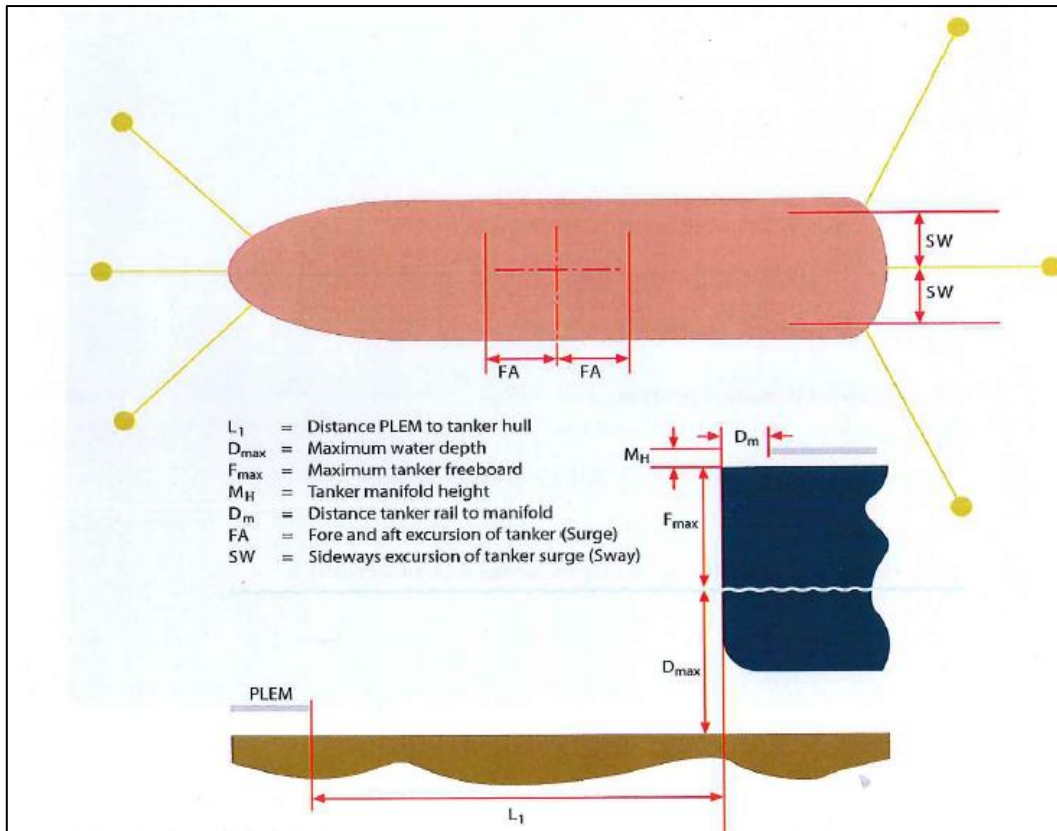
FAmax=Desplazamiento longitudinal buque

SWmax=Desplazamiento transversal buque

SF=Factor de seguridad

La Figura 4.6 muestra cada una de las variables a considerar para realizar el cálculo aproximado del largo de la línea de flexibles.

Figura 4.6. Cálculo de aproximación del largo de flexibles



FUENTE: OCIMF (2010)

La Tabla 4.7 muestra los criterios de movimientos de buques para condiciones de trabajo seguras según PIANC (1995), para definir los movimientos longitudinales y transversales límites para operar de forma segura.

De la Tabla 4.7 se definió para naves Oil Tanker una libertad de movimiento de 5 [m] para el desplazamiento longitudinal y transversal del buque.

Tabla 4.7. Criterios de movimientos para condiciones de trabajo seguras

Ship Type	Cargo Handling Equipment	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
Fishing vessels	Elevator crane	0.15	0.15				
	Lift-on-lift-off	1.0	1.0	0.4	3	3	3
	suction pump	2.0	1.0				
Freighters, coasters	Ship's gear	1.0	1.2	0.6	1	1	2
	Quarry cranes	1.0	1.2	0.8	2	1	3
Ferries, Ro-Ro	Side ramp ²	0.6	0.6	0.6	1	1	2
	Dew/storm ramp	0.8	0.6	0.8	1	1	4
	linkspan	0.4	0.6	0.8	3	2	4
	Rail ramp	0.1	0.1	0.4	-	1	1
General cargo	-	2.0	1.5	1.0	3	2	5
Container vessels	100% efficiency	1.0	0.6	0.8	1	1	3
	50% efficiency	2.0	1.2	1.2	1.5	2	6
Bulk carriers	Cranes	2.0	1.0	1.0	2	2	6
	Elevator/ bucket-wheel	1.0	0.5	1.0	2	2	2
	Conveyor belt	5.0	2.5		3		
Oil tankers	Loading arms	3.0 ³	3.0				
Gas tankers	Loading arms	2.0	2.0		2	2	2

Remarks: ¹⁾ Motions refer to peak-peak values (except for sway: zero-peak).
²⁾ Ramps equipped with rollers.
³⁾ For exposed locations 5.0 m (regular loading arms allow large movements)

FUENTE: PIANC (1995)

4.7 DEFINICIÓN BOYARÍN DE LEVANTE

- i. Obtención de los pesos asociados a las cadenas de levante que intentan hundir el boyarín de levante.
- ii. Cálculo del empuje del agua sobre el boyarín de levante.
- iii. Verificación de las dimensiones del boyarín de levante.

5 RESULTADOS

5.1 ESTUDIO DE CONDICIONES NATURALES DEL SECTOR

5.1.1 ESTUDIO DE OLAS

5.1.1.1 MODELACIÓN DE OLEAJE AL SITIO DE INTERÉS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las propagaciones realizadas con el modelo SWAN, las cuales fueron utilizadas para transformar la data en aguas profundas del nodo N10 localidad Talcahuano al sitio de interés.

La Tabla 5.1 presenta la matriz de coeficientes de agitación (K_a) y la Tabla 5.2 la matriz de direcciones obtenidas de las propagaciones de oleaje de la modelación.

Tabla 5.1. Matriz de coeficientes de agitación (K_a)

Rango de Tp [s]	Rango de direcciones								
	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S
[5-6.5]	0.85	0.86	0.96	0.29	0.64	0.97	0.09	0.04	0.02
[6.5-8.5]	0.72	0.89	0.95	0.24	0.54	0.82	0.07	0.04	0.02
[8.5-10.5]	0.69	0.85	0.91	0.24	0.52	0.78	0.08	0.04	0.02
[10.5-12.5]	0.68	0.84	0.88	0.25	0.50	0.75	0.10	0.05	0.03
[12.5-14.5]	0.70	0.84	0.86	0.27	0.50	0.72	0.13	0.07	0.04
[14.5-16.5]	0.73	0.85	0.84	0.30	0.49	0.69	0.17	0.09	0.05
[16.5-18.5]	0.70	0.81	0.78	0.30	0.45	0.63	0.19	0.11	0.06
[18.5-20.5]	0.57	0.66	0.64	0.24	0.36	0.51	0.16	0.10	0.05
[20.5-22.5]	0.45	0.52	0.51	0.19	0.29	0.41	0.12	0.07	0.04
[22.5-24.5]	0.39	0.45	0.43	0.16	0.25	0.35	0.11	0.06	0.03

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tabla 5.2. Matriz de direcciones

Rango de Tp [s]	Rango de direcciones								
	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S
[5-6.5]	339	317	316	285	293	303	270	271	277
[6.5-8.5]	338	330	316	287	295	304	276	276	279
[8.5-10.5]	337	329	316	289	296	304	281	281	282
[10.5-12.5]	335	328	316	291	297	305	287	285	285
[12.5-14.5]	333	327	317	294	298	306	292	290	289
[14.5-16.5]	332	326	317	295	299	307	294	294	293
[16.5-18.5]	331	326	317	297	300	307	296	296	295
[18.5-20.5]	330	326	317	297	300	307	296	296	296
[20.5-22.5]	331	326	317	296	300	307	296	296	295
[22.5-24.5]	331	326	317	296	300	307	296	296	295

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.1.1.2 CLIMA MEDIO EN EL SECTOR DE ESTUDIO

El análisis de clima medio u operacional se realiza para determinar el oleaje reinante en la zona de interés (ver sección 4.1.1.2), además de visualizar la dirección del oleaje propagado desde aguas profundas a aguas someras junto a su altura y períodos correspondientes.

En el ANEXO A se presentan las tablas de incidencia para Hs-Dir, Tp-Dir, Hs-Tp, Histogramas de frecuencia relativa para Hs, Tp y Dir y rosas de oleaje direccional para el nodo de interés.

La máxima altura significativa identificada fue de 6.74 [m], asociada a un estado de mar cuya incidencia local fue de 317°, con un periodo peak de 14 [s]. En cuanto al máximo periodo peak de 23.95 [s], fue identificado para un estado de mar con incidencia local de 334.1° y una altura significativa de 0.23 [m].

El rango de alturas significativas de 0 a 0.5 [m] fue donde se registró la mayor frecuencia de ocurrencia 68.16% y en segundo lugar para rangos de altura entre 0.5 a 1.0 [m] con un 16.36%. En cuanto a las direcciones, la incidencia reinante es la WNW, con un 81.03 % del total de ocurrencias y en segundo lugar la NW con 11.24%.

Respecto a la distribución de periodos peak, la mayor cantidad de ocurrencias está asociada al rango de 13 a 15 [s], con una frecuencia del 44.42 %, y en segundo lugar la ocurrencia de periodos entre 11 a 13 [s], con una frecuencia del 35.8 %.

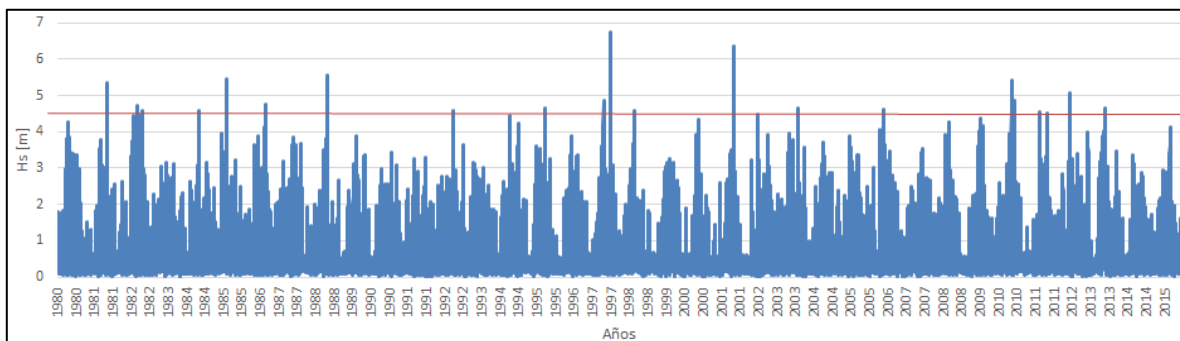
El rango de alturas de olas significativas entre 0 a 1.0 [m] presenta un total de 85.14 % del total de la estadística, de los cuales están asociados principalmente a períodos de ola de rangos 11 a 13 [s], con una frecuencia de 29.28%, 13 a 15 [s] con un 39.18% y 15 a 17 [s] con un 5.76 %.

5.1.1.3 CLIMA EXTREMO DE OLAJE EN EL SECTOR DE ESTUDIO

Para el análisis del oleaje extremo, se aplicó el método POT con un umbral de altura de ola de Hs= 4.5 [m]. Como se puede apreciar en la Figura 5.1 existen varios años en la serie de tiempo con alturas de olas que no superan el umbral de Hs= 4.5 [m], por lo que se consideró mejor para este caso utilizar el método POT sobre el de máximos anuales.

La Tabla 5.3 presenta las mayores alturas de ola por año, asociado a su período y dirección.

Figura 5.1. Serie de tiempo Hs [m] en la zona del proyecto



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tabla 5.3. Alturas de ola máximas método POT

Año	Hs[s]	Tp [s]	Dir p [°]	Año	Hs[s]	Tp [s]	Dir p [°]
1997	6.7	14	317	2003	4.7	10	316
1997	6.7	12	316	2013	4.7	16	307
2001	6.4	10	316	2010	4.6	15	307
1988	5.6	10	329	1995	4.6	9	316
1985	5.5	16	307	1997	4.6	15	307
2010	5.4	10	316	2006	4.6	11	316
1981	5.4	15	307	1992	4.6	16	307
1988	5.1	11	316	1984	4.6	14	306
2012	5.1	11	316	1998	4.6	12	305
1985	4.9	16	307	1982	4.6	9	316
1997	4.9	10	316	2011	4.6	15	307
2010	4.9	16	307	2012	4.5	11	316
1986	4.8	12	305	2011	4.5	14	306
1997	4.8	15	307	2010	4.5	15	307
1982	4.7	10	316				

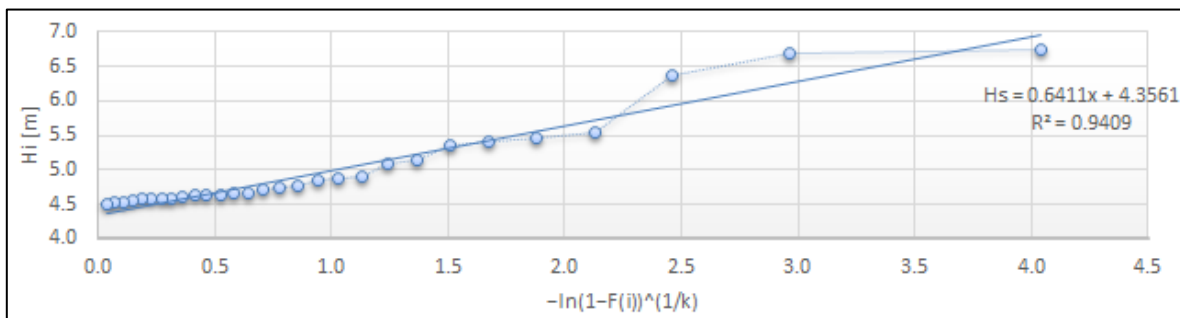
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se determinaron 29 eventos extremos que permitieron desarrollar el análisis. De la Tabla 5.3, se observa que la mayor altura de ola es de 6.7 [m], el promedio de períodos es de 13 [s], y el promedio de direcciones de ola asociados a los eventos extremos es de 312 ° (dirección NW).

Se utilizaron las distribuciones de Gumbel, Weibull (Goda), Weibull (Petraukas) y Log-Normal para todos los valores de k existentes, donde la mejor correlación se obtuvo mediante la distribución Weibull k=1, con un 94.09 % de confianza. En la Tabla B.1 del ANEXO B se presentan los resultados de las funciones de distribución de probabilidad para clima extremo.

La Figura 5.2 muestra el gráfico de correlación mediante el método Weibull – Petraukas con k=1.

Figura 5.2. Gráfico de correlación método Weibull-Petraukas k=1



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Una vez obtenida la distribución más confiable para aplicar, se procedió a aplicar los cálculos con la distribución Weibull mediante la siguiente expresión linealizada:

$$x = A(-\ln(1 - F))^{1/k}$$

Donde:

$$F = 1 - \frac{1}{\lambda T}$$

T=Período de retorno

n=Número de datos

$\lambda = n/\text{Años}$

A	0.6411
B	4.3561
λ	1
n	29
Años	29

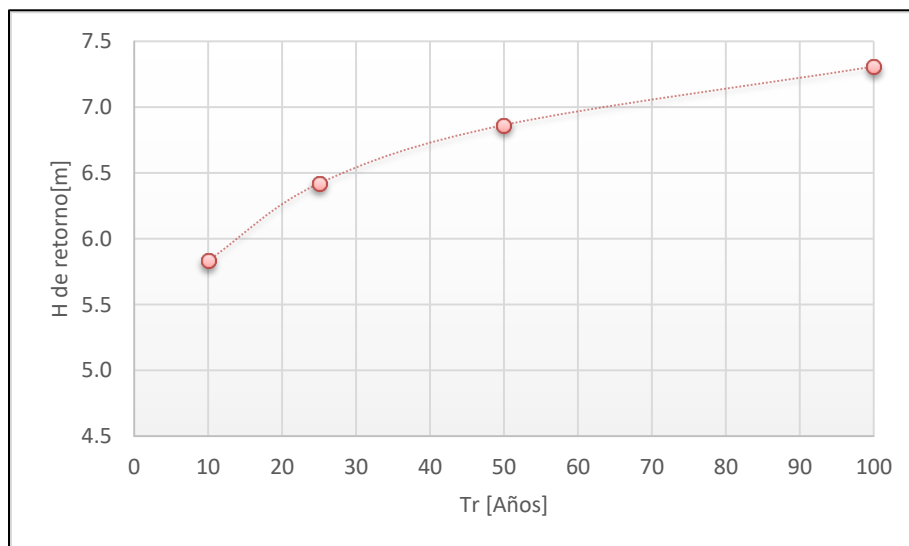
Las alturas de ola asociadas a los períodos de retorno se presentan en la Tabla 5.4 y Figura 5.3.

Tabla 5.4. Período de retorno asociado a distribución Weibull k=1

Periodos Retorno (años)	F	H de retorno [m]
10	0.9	5.83
25	0.96	6.42
50	0.98	6.86
100	0.99	7.31

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.3. Gráfico H retorno [m] vs T retorno [años]



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.1.2 ESTUDIO DE CORRIENTES

Los resultados del estudio de corrientes efectuado por la firma Geomar, entre julio y agosto de 2003, se resumen en la Tabla 5.5 y la Tabla 5.6. Los resultados indican un predominio de las direcciones asociadas al 1er y 2do cuadrante. Las coordenadas de los correntómetros utilizados en el estudio son E663862 y N5931643, punto que corresponde al veril -14.8 [m] NRS (PRWD, 2005).

Tabla 5.5. Tabla de incidencia de corrientes - correntómetro superficial

Magnitud [cm/s]	Dirección								Total
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
0.0 - 1.0	20	29	29	34	33	31	30	28	234
1.1 - 3.0	111	173	157	137	170	166	124	122	1160
3.1 - 5.0	116	259	252	190	222	201	129	100	1469
5.1 - 7.0	85	197	200	137	97	131	91	38	976
7.1 - 9.0	32	72	140	63	39	80	55	22	503
9.1 - 11.0	10	35	52	17	12	41	26	14	207
11.1 - 13.0	2	16	17	1	2	9	37	3	87
13.1 - 15.0	3	18	14	1		4	39	4	83
> 15.0	7	18	12	2	2	8	13	1	63
Total efectivo	366	788	844	548	544	640	514	304	4548
Incidencia [%]	7.7	16.5	17.6	11.5	11.4	13.4	10.7	6.4	95.1
Máximo [cm/s]	23.0	19.4	22.8	23.4	17.6	19.6	19.4	21.4	23.4
Media [cm/s]	4.8	5.5	5.7	4.8	4.3	5.2	6.4	4.4	5.2
Total Data									4782

FUENTE: PRWD (2005)

Tabla 5.6. Tabla de incidencia de corrientes - correntómetro profundo

Magnitud [cm/s]	Dirección								Total
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
0.0 - 1.0	4	7	7	7	9	14	7	3	58
1.1 - 3.0	16	19	11	14	20	19	10	12	121
3.1 - 5.0	11	10	4	3	2	4	6	7	47
5.1 - 7.0	1			1		1	3		6
7.1 - 9.0	2	1						3	6
9.1 - 11.0		1							1
11.1 - 13.0									
13.1 - 15.0									
> 15.0									
Total efectivo	30	31	15	18	22	24	19	22	181
Incidencia [%]	12.6	13.0	6.3	7.5	9.2	10.0	7.9	9.2	75.7%
Máximo [cm/s]	8.0	9.9	4.1	6.6	4.1	6.7	7.0	8.6	9.9
Media [cm/s]	3.2	2.9	2.4	2.6	2.2	2.3	3.4	3.4	2.8
Total Data									239

FUENTE: PRWD (2005)

Se observa un leve predominio de las corrientes hacia el Este, con magnitudes entre 1 y 7 [cm/s] en el correntómetro superficial. Para el correntómetro profundo se observa predominio de corrientes hacia el Noreste y magnitudes entre 1 y 5 [cm/s]. En las mayores velocidades predominan las direcciones Este, Noreste y Oeste con magnitudes sobre 15 [cm/s] en la superficie.

Las magnitudes de corrientes observadas son débiles como mecanismo de transporte de sedimentos por arrastre de fondo, como es el caso de las arenas. Estas magnitudes solo tienen capacidad de transporte advectivo de finos en suspensión (limos y arcillas) (PRWD, 2005).

Otro estudio realizado en la bahía de Coronel por PRDW (2008) indica que la magnitud de las corrientes no supera los 25 cm/s, con un valor medio de 7.15 cm/s, a 8 [m] de profundidad. El promedio de las magnitudes de la corriente es de 7.14 cm/s, en los que un 44% es generado por viento y un 56% generada por el régimen mareal.

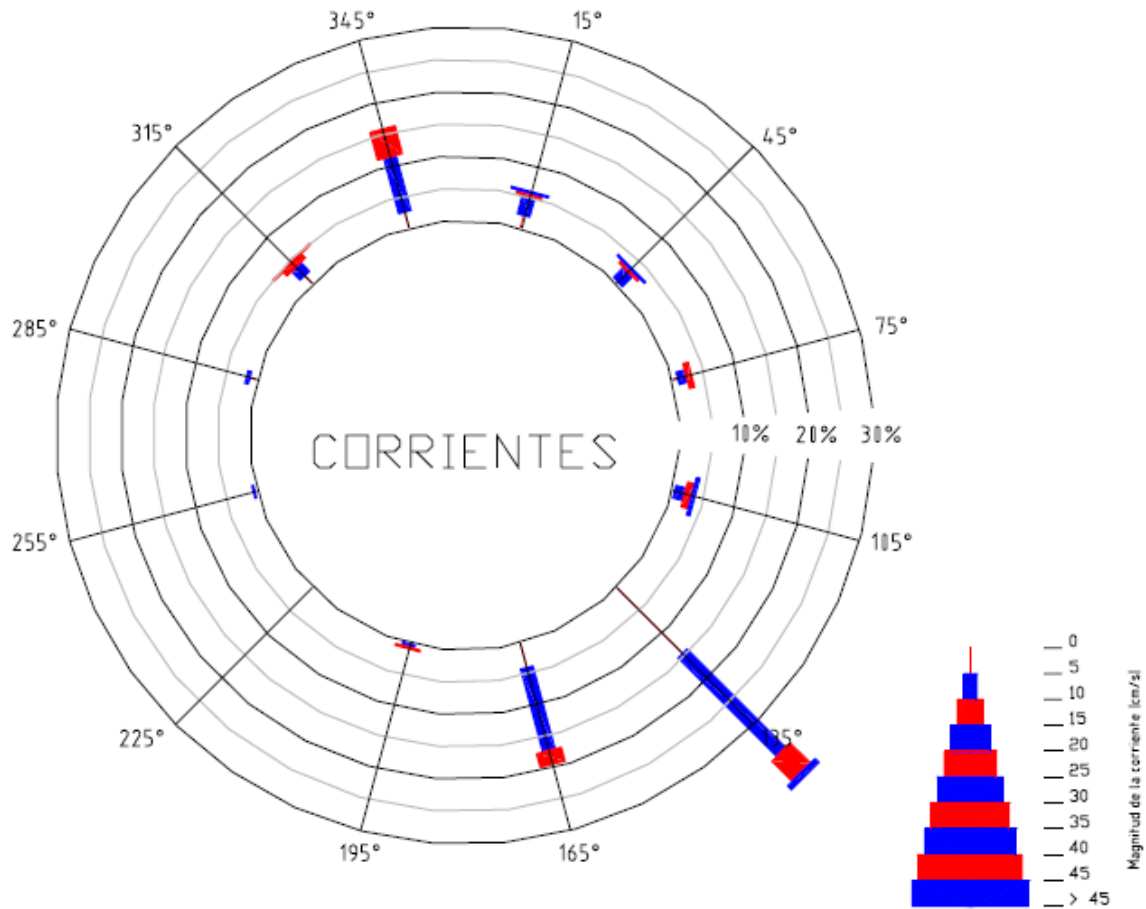
En general, se observaron corrientes hacia el Norte, cuya componente superficial alcanzó máximas de hasta 41 cm/s. En la Figura 5.4 se presenta la rosa de corrientes.

Las corrientes máximas se utilizaron para obtener el distanciamiento de los elementos de los muertos de fijación para las cañerías submarinas. En este caso conservadoramente se utilizó como corriente de diseño la corriente mayor en la superficial.

La estadística de un mes de la corriente superficial se utilizó además para obtener el downtime operacional por corrientes (sección 5.2.3), el cual sirvió como criterio para orientar

la posición final del buque, y para la corriente de diseño para obtener las cargas sobre el buque en el cálculo de fondeo.

Figura 5.4. Rosa de corrientes



FUENTE: PRWD (2008)

5.1.3 ESTUDIO DE MAREAS

En la Tabla 5.7 se presentan los siguientes planos mareales en la Bahía de Coronel.

Tabla 5.7. Caracterización de la marea de la Bahía de Coronel

Marea	Altura [m NRS]
Pleamar máxima	1.83
Pleamar media de sicigias	1.69
Nivel Medio del Mar	0.81
Bajamar media de sicigias	0.1
Bajamar mínima	-0.05

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE PRWD (2008)

Cabe destacar que no es necesario realizar un análisis armónico de mareas debido a que las estructuras offshore tendrán casi nula alteración por la marea.

5.1.4 ESTUDIO DE VIENTOS

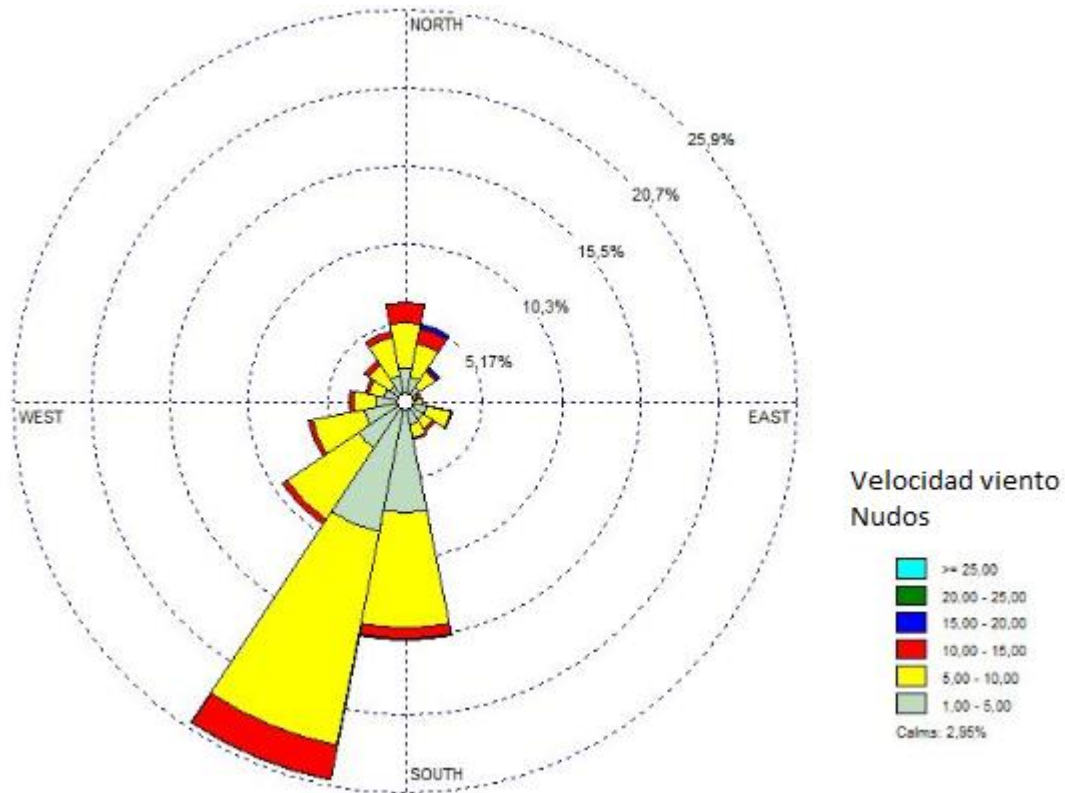
La Tabla 5.8 y la Figura 5.5 presentan la Tabla de incidencia de vientos en el sector de estudio (%) y la rosa de vientos direccional perteneciente a la estadística de FCMC (2012).

Tabla 5.8. Tabla de incidencia de vientos en el sector de estudio

Rango de direcciones [°]		Rango de velocidades [Nudos]					Total	Frec.acumulada
		]1,00 - 5,00]	]5,00 - 10,00]	]10,00 - 15,00]	]15,00 - 20,00]	]20,00 - 25,00]		
[348.75-11.25[	N	2.24	3.15	1.31	0.05	0	6.75	6.75
[11.25-33.75[	NNE	1.79	2.23	1.09	0.29	0.01	5.41	12.16
[33.75-56.25[	NE	1.25	1.21	0.27	0.14	0	2.88	15.04
[56.25-78.25[	ENE	0.50	0.44	0.24	0.01	0	1.18	16.22
[78.75-101.25[	E	0.59	0.60	0.06	0	0	1.25	17.47
[101.25-123.75[	ESE	1.59	1.57	0.17	0	0	3.33	20.79
[123.75-146.25[	SE	1.51	0.77	0.21	0	0	2.49	23.28
[146.25-168.75[	SSE	1.62	0.93	0.17	0.02	0	2.74	26.02
[168.75-191.25[	S	7.61	7.76	0.68	0.13	0	16.18	42.20
[191.25-213.75[	SSW	9.00	14.74	2.32	0.04	0	26.10	68.31
[213.75-236.25[	SW	3.88	5.74	0.40	0	0	10.03	78.33
[236.25-258.75[	WSW	2.87	3.55	0.31	0	0	6.72	85.06
[258.75-281.25[	W	1.93	1.60	0.25	0.01	0	3.80	88.85
[281.25-303.75[	WNW	1.60	0.99	0.21	0.00	0	2.81	91.66
[303.75-326.25[	NW	1.36	1.62	0.44	0.01	0	3.42	95.08
[326.25-348.75[	NNW	1.85	2.62	0.44	0.01	0	4.92	100
	Total	41.19	49.53	8.55	0.72	0.01	100	
	Frec.acumulada	41.19	90.72	99.27	99.99	100		

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS GENERADOS EN FCMC (2012)

Figura 5.5. Rosa de vientos



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

De los datos graficados tanto en la Tabla 5.8 como en la Figura 5.5, se puede apreciar que el mayor porcentaje de direcciones de vientos proviene de las direcciones S,SW,SSW con un 52.23% del total de la estadística, y vientos entre 1 a 10 Nudos con un 90.72 % del total de la estadística.

5.2 ESTIMACIÓN DEL DOWNTIME OPERACIONAL

5.2.1 DOWNTIME POR OLAJE

Para la estimación del downtime operacional por oleaje, se analizan las condiciones de oleaje definidos en la sección 5.1.1.2. Se definió un umbral de operación de una altura de ola de 1.5 [m] para oleaje que golpee al buque en dirección paralela a la línea de crujía del buque, y un umbral de operación de 1 [m] para oleaje que golpee al buque en ángulos entre 45° a 90° según la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Máxima altura significativa de oleaje para diferentes direcciones

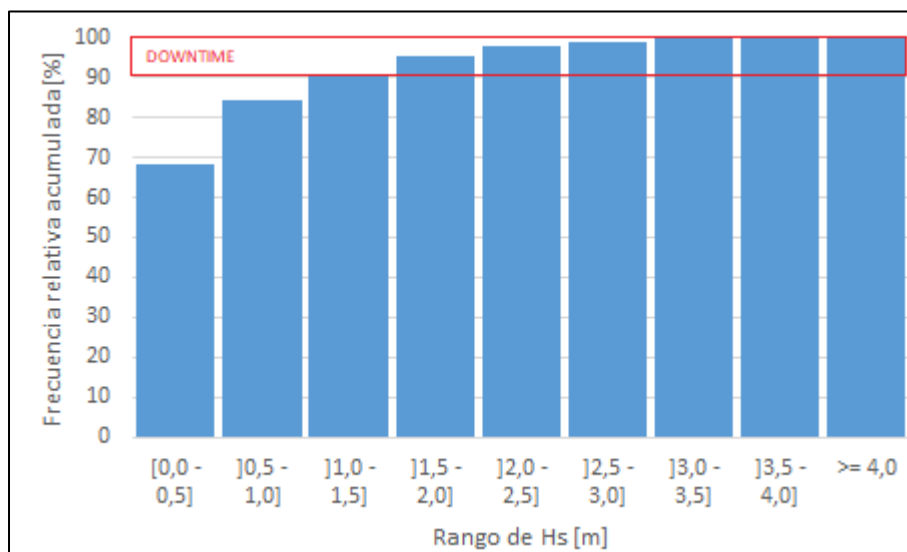
Type of ship	Limiting wave height H_s in metres	
	0° (head on or stern on)	45°–90°
General cargo	1.0	0.8
Container, ro/ro ship	0.5	
Dry bulk 30 000–100 000 dwt loading	1.5	1.0
Dry bulk 30 000–100 000 dwt unloading	1.0	0.8–1.0
Tankers 30 000 dwt	1.5	
Tankers 30 000–200 000 dwt	1.5–2.5	1.0–1.2
Tankers 200 000 dwt	2.5–3.0	1.0–1.5

FUENTE: THORENSEN (2003)

Las direcciones predominantes de oleaje en el sitio de interés vienen de las direcciones WNW con 81.03%, NW con 11.24% y W con 7.55 % (ver Figura A.2 del ANEXO A). Esto quiere decir que una potencial alineación del buque tanque es ubicar su proa en dirección WNW, enfrentando la ola. Así el buque ofrece una menor área.

La Figura 5.6 muestra gráficamente el rango de alturas vs frecuencia acumulada para la estimación del downtime operacional por oleaje, considerando un umbral de operación de $H_s=1.5$ [m] en dirección WNW.

Figura 5.6. Cálculo de downtime en por oleaje



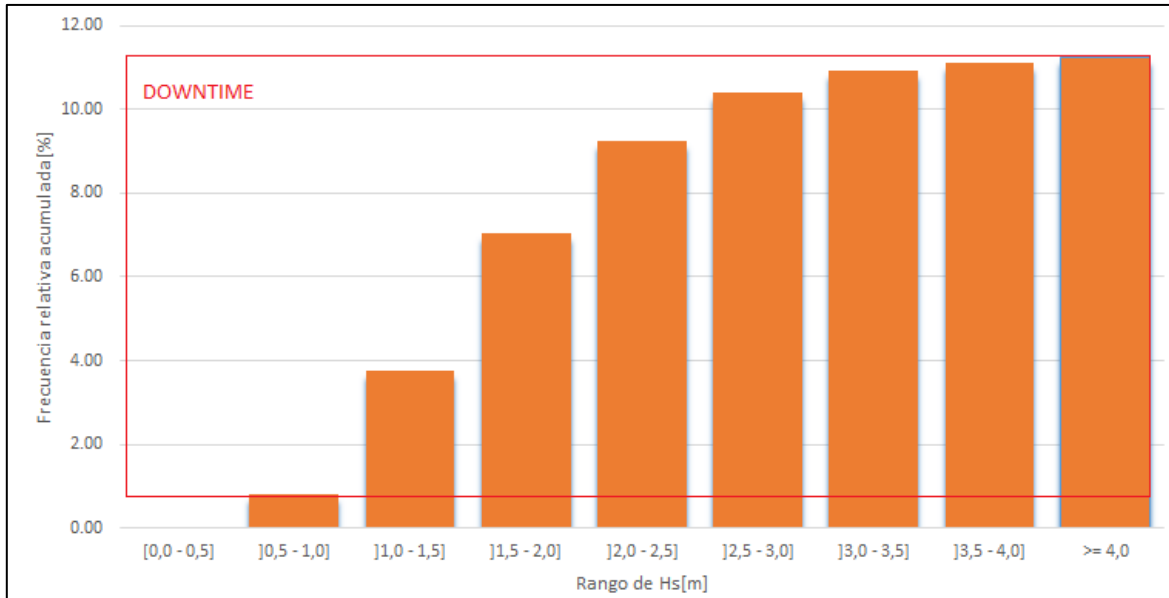
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se puede apreciar que el downtime operacional o tiempo de inactividad del buque tanque durante operaciones de carga y descarga de productos sería de 10%, lo cual sería un porcentaje aceptable según Thorensen (2003) (90-95% de operatividad).

Según la Figura A.1 del ANEXO A, el oleaje proveniente del W no requiere limitar su altura de operación, ya que todas las alturas de ola pertenecen a un rango de alturas entre 0-0.5 [m]. Respecto al oleaje proveniente del NW, este puede azotar al buque con ángulos de 45°, por lo que se limitó su altura de ola a $H_s=1$ [m].

La Figura 5.7 muestra gráficamente el rango de alturas vs frecuencia acumulada para la estimación del downtime operacional por oleaje, considerando un umbral de operación de $H_s=1$ [m] en dirección NW.

Figura 5.7. Cálculo de downtime en por oleaje dirección NW



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

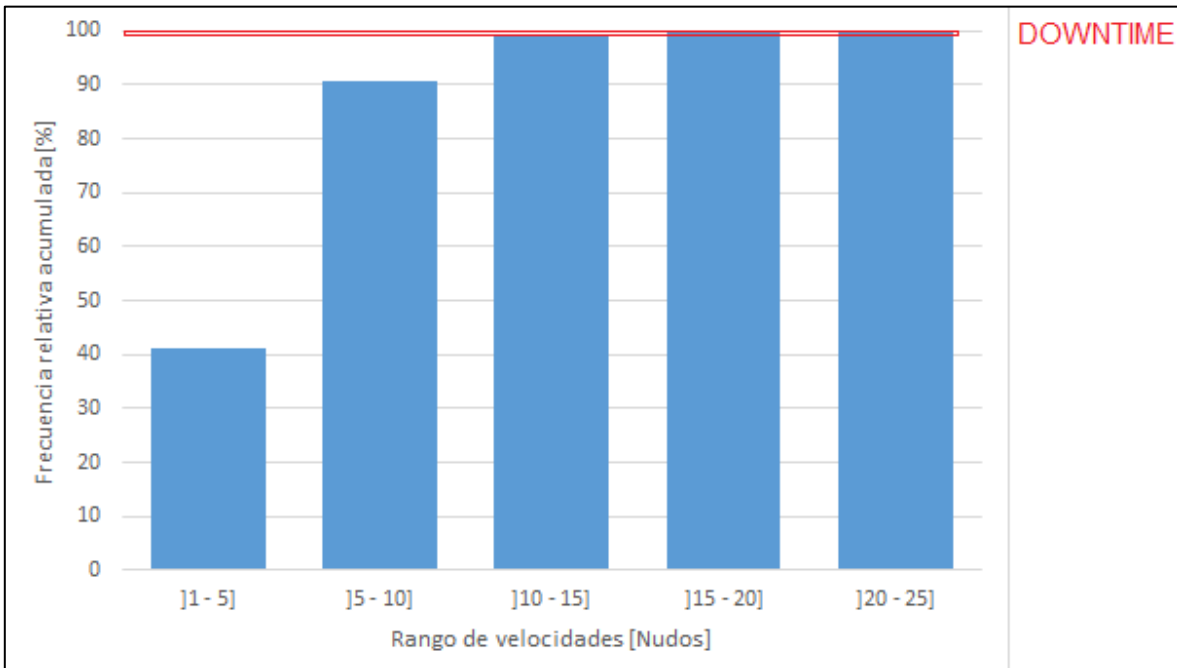
Del total de la estadística de oleaje observada entre los años 1980-2015 perteneciente a la dirección NW con un 11.24%, se puede apreciar que un pequeño porcentaje de oleaje está entre los rangos de 0 a 1 [m] (0.83%), por lo cual se deduce que cuando hay oleaje perteneciente a la dirección NW no es recomendable la operación del buque, debido a que el 99.17% del oleaje perteneciente a esta dirección genera downtime.

Según Thorensen (2003) el promedio de disponibilidad operacional no debe ser menor de 90- 95 por ciento debido al costo adicional de tiempo de espera para los buques, por lo que se verifica que el área fondeo de la nave sería óptima para el emplazamiento de obras.

5.2.2 DOWNTIME POR VIENTO

En la Figura 5.8 se presenta un gráfico de frecuencia relativa acumulada [%] vs rango de velocidades [Nudos] para realizar un análisis del downtime operacional del buque tanque por efectos del viento.

Figura 5.8. Estimación de downtime operacional por viento



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

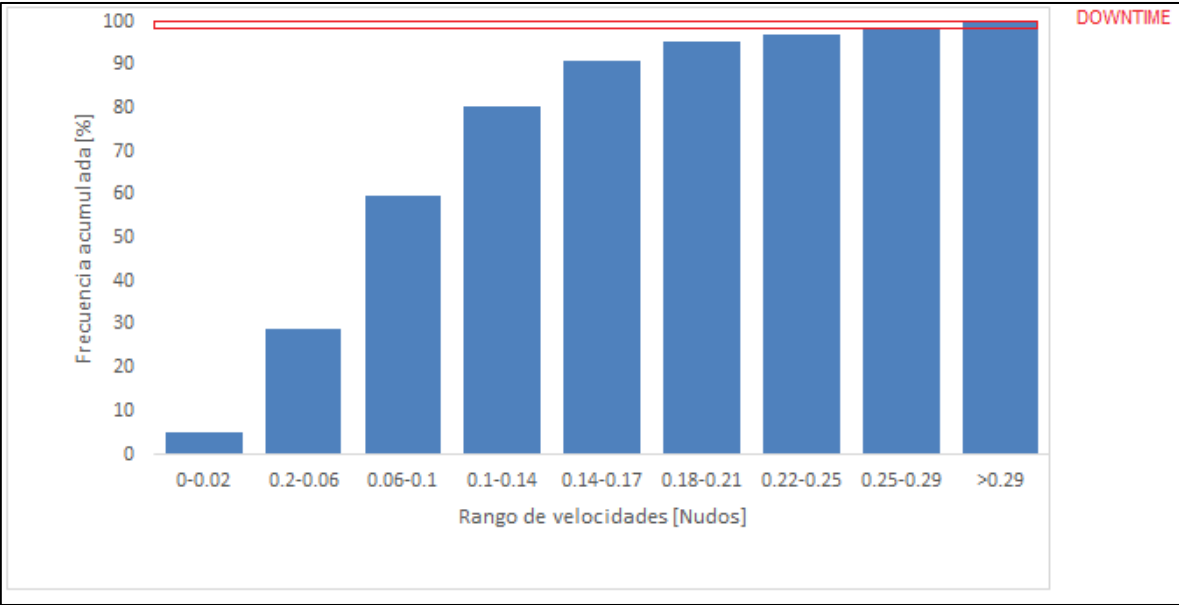
Se observa que el downtime operacional por viento es del 0.73%, lo cual se considera un porcentaje de tiempo de inoperatividad bajo y aceptable para realizar operaciones de carga y descarga de productos.

Cabe destacar que no es posible optimizar la orientación al viento (dirección SW), ya que los elementos de fondeo de las pernadas de trabajo de las boyas generarían obstrucción en las cañerías de transferencia de combustible.

5.2.3 DOWNTIME POR CORRIENTES

En la Figura 5.9 se presenta un gráfico de frecuencia relativa acumulada [%] vs rango de velocidades [Nudos] para realizar un análisis del downtime operacional del buque tanque por efectos de las corrientes.

Figura 5.9. Estimación de downtime operacional por corriente



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El downtime operacional por corrientes se definió con un umbral de operación de 0.5 [Nudos], y este al estar dentro del rango de velocidades mayores a 0.29 [Nudos] quiere decir que el downtime operacional sería menor al 1.32%, lo cual se considera un porcentaje de tiempo de inoperatividad bajo y aceptable para realizar operaciones de carga y descarga de productos.

5.3.1.1 DETERMINACIÓN DEL U.K.C (RESGUARDO BAJO LA QUILLA)

La profundidad mínima de seguridad, se calcula sobre la base de los siguientes parámetros, según OCDI (2002):

- 10% de resguardo sobre el calado máximo del buque
- 2/3 ola de incidencia (1,5 [m])
- Efectos de escora ($1/2 \text{ Manga} \times \tan 2^\circ$)

$$\text{U.K.C.} = 0.1 \times \text{Calado Máximo} + 2/3 \times \text{Ola de Operación} + 0.5 \times \text{Manga} \times \tan 2^\circ$$

De la fórmula se desprende que el U.K.C. es:

Calado máximo $C_m := 13.62\text{m}$

Ola de operación $H_s := 1.5\text{m}$

Manga $M := 32.21\text{m}$

$$\text{UKC} := 0.1 \cdot C_m + \frac{2}{3} \cdot H_s + 0.5 \cdot M \cdot \tan(2 \cdot \text{deg})$$

$$\text{UKC} = 2.92\text{m}$$

En razón del cálculo anterior, se desprende que la profundidad requerida, incluido el U.K.C. en el sitio de fondeo es de 16.5 [m], o bien 2.92 [m] de agua entre el fondo marino y la quilla del buque. Sin embargo, es recomendable ubicar al buque a una mayor profundidad para permitir que este tenga un mayor grado de libertad para maniobrar, y disminuir riesgos de que la quilla del buque tope con la cañería submarina.

OCIMF (2010) indica que los terminales multiboya que no sean orientados respecto a las corrientes dominantes se les puede adicionar UKC o profundidad de emplazamiento para reducir o limitar las corrientes inducidas en el sistema de amarre. Esto permitiría incrementar los movimientos longitudinales y transversales del buque, además de aportarles facilidad a la maniobra de amarre para que el buque no sobrepase el límite de resguardo bajo la quilla permitido.

5.3.2 DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL AMARRE

Para determinar la orientación adecuada del buque tanque y permitir su operatividad sin problemas, OCIMF (2010) aconseja que el eje longitudinal del buque sea paralelo a las condicionantes naturales de vientos, olas y corrientes para minimizar las cargas del buque amarrado y reducir accidentes.

Como consideraciones especiales para definir el layout de un terminal marítimo multiboya, OCIMF (2010) recomienda los siguientes puntos:

- En lugares con mínimas corrientes y olas se recomienda orientar proa o popa respecto a los vientos predominantes.

- Restricción de altura de ola 1.5 [m] durante el atraque, y altura de ola de 2 [m] cuando el buque esté amarrado tanto a popa como a proa firmemente.
- Los sistemas de amarre multiboya convencional, al depender de las anclas a proa requieren un gran espacio de maniobra para los anclajes.
- Proponer espacio de maniobra adecuado, con aproximación al atraque en 90° de la línea central, distancia segura de obstrucciones tanto de las boyas, líneas de amarre y tuberías submarinas.
- Considerar profundidad de agua mínima para aproximación del buque tanque a la zona de atraque (UKC).

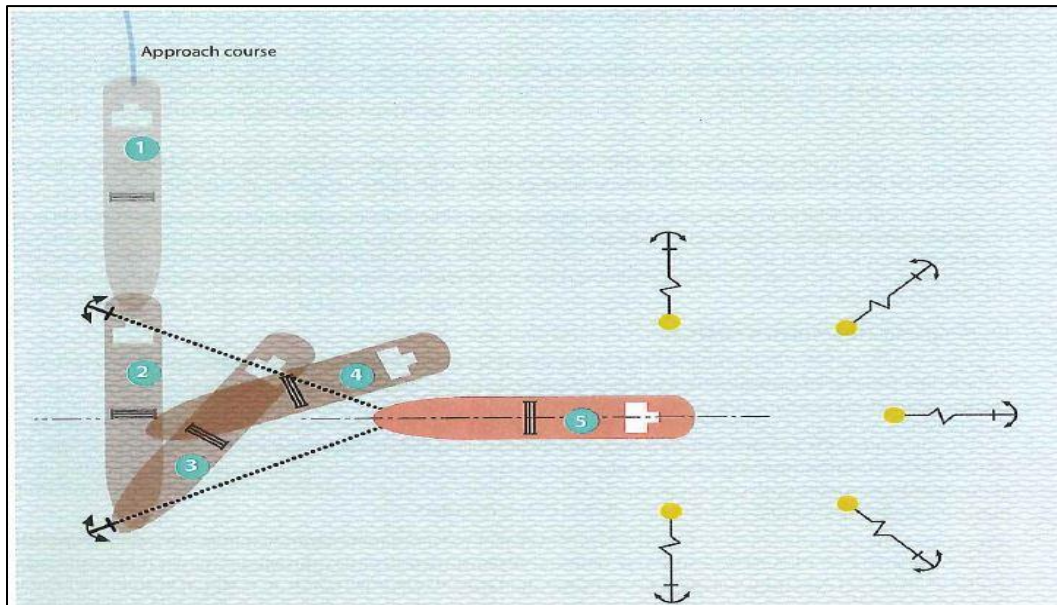
Tomando en consideración que el downtime operacional de oleaje (10%) es mucho mayor al downtime operacional por vientos (1%) y corrientes (1%), el buque se orientó la proa del buque respecto a la dirección predominante de oleaje del WNW (292.5°). De esta manera el buque ofrece una menor área al embate del oleaje.

Otro factor importante a la hora de elegir la orientación óptima de un terminal marítimo, sobre todo un sistema de amarre de boyas convencional (CBM) que depende de las anclas propias del buque a proa, es el método de aproximación del buque a la zona de amarre.

El buque se aproxima al fondeadero en 90° de la línea central de fondeo, suelta un ancla, continúa avanzando tendiendo cadena hasta obtener el alcance deseado. Después de desplegar los anclajes, es habitual que el petrolero maniobre con la popa primero hasta alcanzar la posición deseada en el fondeadero, para posteriormente ser amarrado a las boyas. La Figura 5.11 muestra un ejemplo de aproximación de buque de un CBM y la Figura 5.12 muestra un ejemplo de aproximación de buque a un ABM.

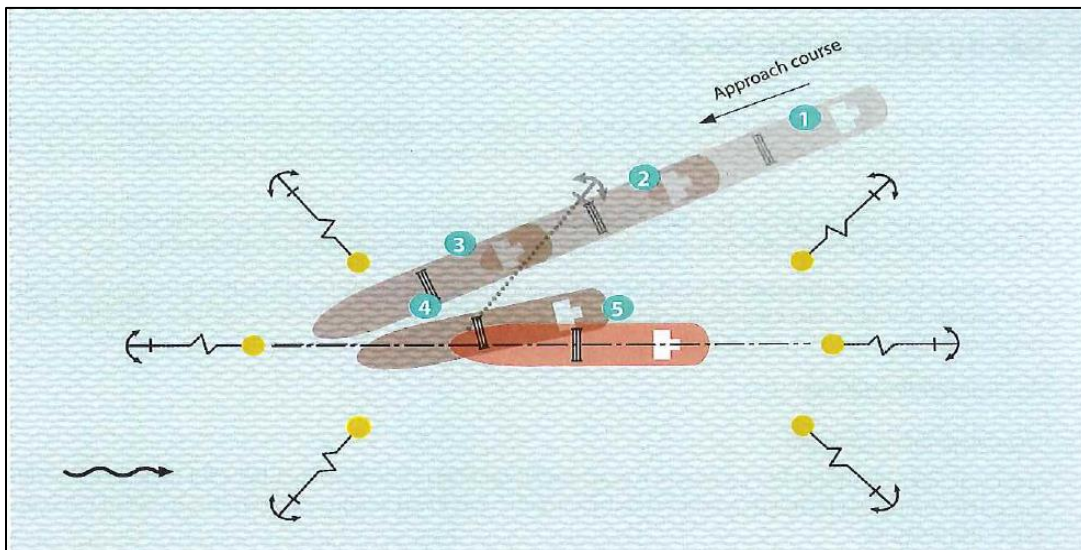
Los petroleros requieren de asistencia limitada de remolcadores y considerar casos especiales de emergencia y abandono. OCIMF (2010) sugiere utilizar estudios de simulación de aproximación de buques, maniobras y posible uso de remolcadores, sin embargo este estudio se escapa del presente proyecto.

Figura 5.11. Aproximación buque en CBM



FUENTE: OCIMF (2010)

Figura 5.12. Aproximación buque en ABM



FUENTE: OCIMF (2010)

Según OCIMF (2010), las anclas deben tener una longitud suficiente para que la tracción de las anclas del buque se desarrolle desde la cadena paralela al fondo del mar, ya que si la cadena es demasiado corta el extremo de la cadena estará inclinado hacia el fondo del mar y el ancla tenderá a retirarse y arrastrarse. La cadena de las anclas del buque debe tener una longitud mínima de 160 a 220 [m] y ángulo entre cadenas de 60° a 90° en planta. NAVFAC (1985) señala que los puntos de amarre múltiples deben tener una disposición simétrica para distribuir cargas equilibradamente tanto en el sentido longitudinal y transversal del buque para sostenerlo rígidamente.

Acorde al análisis anteriormente señalado, orientando la proa del buque en la dirección WNW, este fondearía a las siguientes profundidades respecto al NRS:

- Profundidad a popa: 16.5 [m] aproximadamente acorde al cálculo del UKC.
- Profundidad a la altura del manifold: 30 [m] aproximadamente, cercano al término de la cañería de transferencia de petróleo.
- Profundidad a proa: 33 [m] aproximadamente.

A continuación, se presentan tres alternativas de layout para el terminal marítimo.

a) ALTERNATIVA 1: CBM 3 BOYAS DE AMARRE Y 2 ANCLAS A PROA

Para efectos del ingreso de las naves al terminal, la maniobra asociada al track de enfilación de ingreso estará provisto de anclas a proa, tanto a babor como a estribor.

Las características de amarre del terminal marítimo son las siguientes:

- Tres (03) Boyas de amarre: una (1) por aleta estribor, una (1) por aleta babor y una (1) por popa.
- Se fondearán a proa dos (2) anclas propias de las naves; una (1) por amura estribor y una (1) por amura babor.

A continuación se describen los elementos del sistema de amarre a popa de la nave.

Boya de amarre N°1, aleta babor; la cual debe ser amarrada a una espía de 2 paños equivalentes a 55 [m] y apertura de 50° respecto a la línea de crujía del buque. Dos pernadas de trabajo con apertura de 90°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

Boya de amarre N°2, a popa; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños respecto a la línea de crujía del buque. Dos pernadas de trabajo con apertura de 50°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

Boya de amarre N°3, aleta babor; la cual debe ser amarrada con una espía 2 paños con apertura de 50° respecto a la línea de crujía del buque. Dos pernadas con apertura de 90°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

A continuación se describen los elementos del sistema de amarre a popa de la nave.

Ancla N°1 y N°2 ; el sistema de fijación a proa se compone de dos (2) anclas propias de la nave, dispuestas ambas en una apertura de 70° entre cada una, quedando con seis (6) paños de cadena por amura estribor y seis (6) paños de cadena amura babor.

La enfilación de fondeo del ancla a babor es de 265° DV y la enfilación de fondeo del ancla a estribor es de 345° DV.

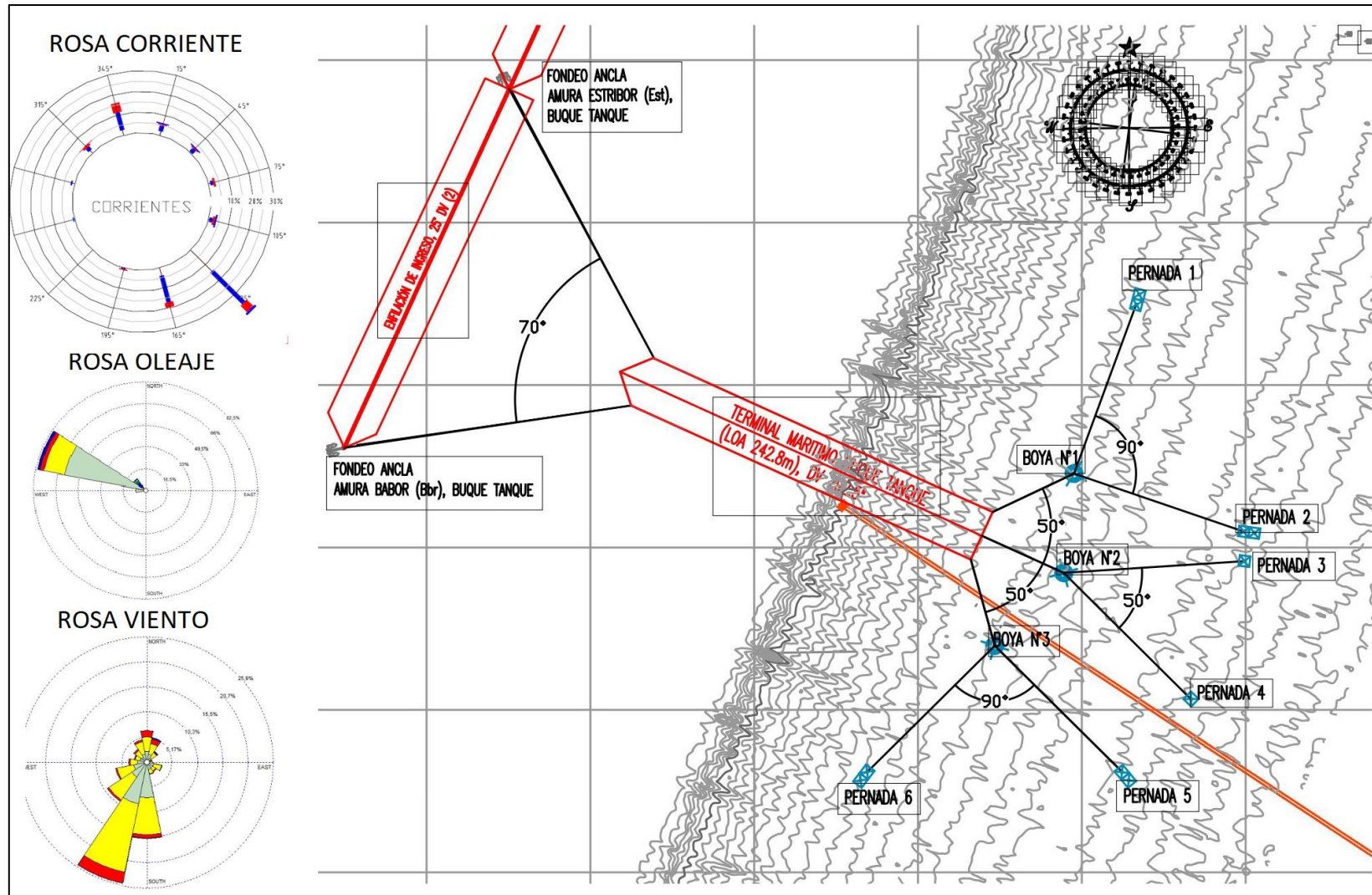
La Figura 5.13 presenta en detalle esta alternativa de layout con el buque LOA 242.8 m orientado en dirección al oleaje reinante dirección WNW (292.5° DV), con 3 boyas de amarre a popa y 2 anclas propias del buque a proa. La Tabla 5.11 muestra las profundidades aproximadas respecto al NRS de los elementos de amarre y fondeo para la alternativa 1.

Tabla 5.11. Profundidades de los elementos de amarre y fondeo de la alternativa 1

ELEMENTO	PROFUNDIDAD NRS [m]
BOYAN°1	-14
PERNADA 1	-14
PERNADA 2	-9
BOYAN°2	-13
PERNADA 3	-9
PERNADA 4	-9
BOYAN°3	-14
PERNADA 5	-10
PERNADA 6	-16
ANCLA N°1 AMURA ESTRIBOR	-35
ANCLA N°2 AMURA BABOR	-35

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.13. Alternativa layout nave LOA 242.8, CBM con 3 boyas de amarre y 2 anclas a proa



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

b) ALTERNATIVA 2: CBM 5 BOYAS DE AMARRE Y 2 ANCLAS A PROA

Para efectos del ingreso de las naves al terminal, la maniobra asociada al track de enfilación de ingreso estará provisto de anclas a proa, tanto a babor como a estribor.

Las características de amarre del terminal marítimo son las siguientes:

- Tres (05) Boyas de amarre: una (01) por aleta estribor, una (01) por aleta babor, una (01) por popa, una (01) por costado amura estribor y una (01) costado por aleta babor.
- Se fondearán a proa dos (02) anclas propias de las naves; una (01) por amura estribor y una (01) por amura babor.

A continuación se describen los elementos del sistema de amarre a popa de la nave.

Boya de amarre N°1, aleta babor; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños equivalentes a 55 metros y apertura de 50° respecto a la línea de crujía del buque. Dos pernadas de trabajo con apertura de 90°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

Boya de amarre N°2, a popa; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños respecto a la línea de crujía del buque. Dos pernadas de trabajo con apertura de 60°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

Boya de amarre N°3, aleta babor; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños con apertura de 50° respecto a la línea de crujía del buque. Dos pernadas de trabajo con apertura de 90°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

A continuación se describen los elementos del sistema de amarre a proa de la nave.

Boya de amarre N°4, costado amura estribor; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños. Dos pernadas de trabajo con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

Boya de amarre N°5, costado amura babor; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños. Dos pernadas de trabajo con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

Ancla N°1 y N°2 ; el sistema de fijación a proa se compone de dos (2) anclas propias de la nave, dispuestas ambas en una apertura de 70° entre cada una, quedando con seis (6) paños de cadena por amura estribor y seis (6) paños de cadena amura babor.

La enfilación de fondeo del ancla a babor es de 265° DV y la enfilación de fondeo del ancla a estribor es de 345° DV.

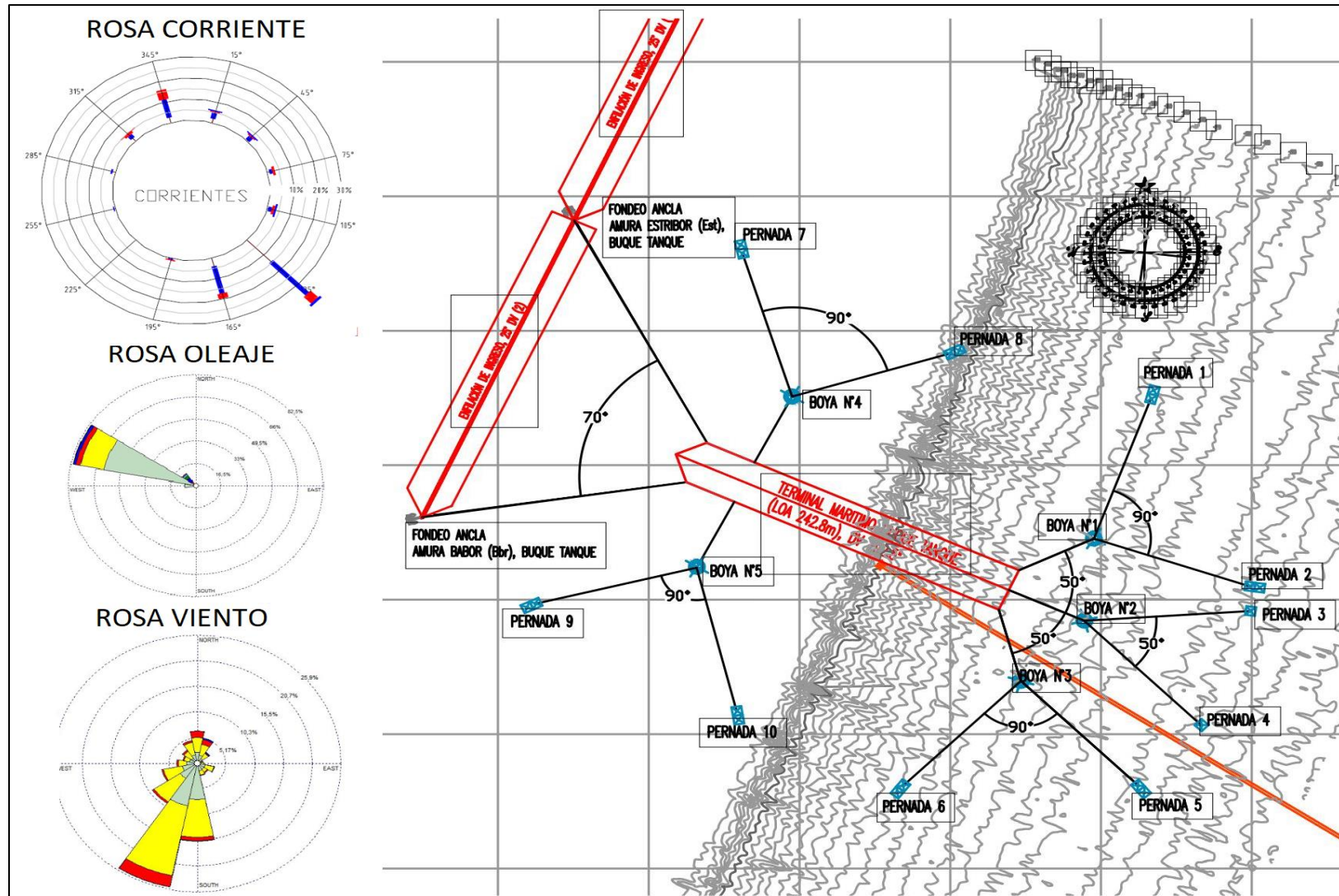
La Figura 5.14 presenta en detalle esta alternativa de layout con el buque LOA 242.8 m orientado en dirección al oleaje reinante WNW (292.5° DV), con 5 boyas de amarre a popa y 2 anclas propias del buque a proa. La Tabla 5.12 muestra las profundidades aproximadas respecto al NRS de los elementos de amarre para la alternativa 2.

Tabla 5.12. Profundidades de los elementos de amarre y fondeo alternativa 2

ELEMENTO	PROFUNDIDAD NRS [m]
BOYA N°1	-14
PERNADA 1	-14
PERNADA 2	-9
BOYA N°2	-13
PERNADA 3	-9
PERNADA 4	-9
BOYA N°3	-14
PERNADA 5	-10
PERNADA 6	-16
BOYA N°4	-33
PERNADA 7	-34
PERNADA 8	-31
BOYA N°5	-33
PERNADA 9	-34
PERNADA 10	-32
ANCLA N°1 AMURA ESTRIBOR	-35
ANCLA N°2 AMURA BABOR	-35

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.14. Alternativa layout nave LOA 242.8, CBM con 5 boyas de amarre y 2 anclas a proa



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

c) ALTERNATIVA 3: ABM CON 5 BOYAS DE AMARRE

Las características de amarre del terminal marítimo son las siguientes:

- Tres (05) Boyas de amarre: una (01) por aleta estribor, una (01) por aleta babor y una (01) por popa, una (01) por amura babor y una (01) por amura estribor

A continuación se describen los elementos del sistema de amarre a popa de la nave.

Boya de amarre N°1, aleta babor; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños equivalentes a 55 metros y apertura de 50° respecto a la línea de crujía del buque. Dos pernadas de trabajo con apertura de 90°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

Boya de amarre N°2, a popa; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños respecto a la línea de crujía del buque. Dos pernadas de trabajo con apertura de 50°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

Boya de amarre N°3, aleta babor; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños con apertura de 50° respecto a la línea de crujía del buque. Dos pernadas de trabajo con apertura de 90°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

A continuación se describen los elementos del sistema de amarre a proa de la nave.

Boya de amarre N°4, amura estribor; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños. Dos pernadas de trabajo con apertura de 90°, con muerto de término. Una retenida con muerto de fijación.

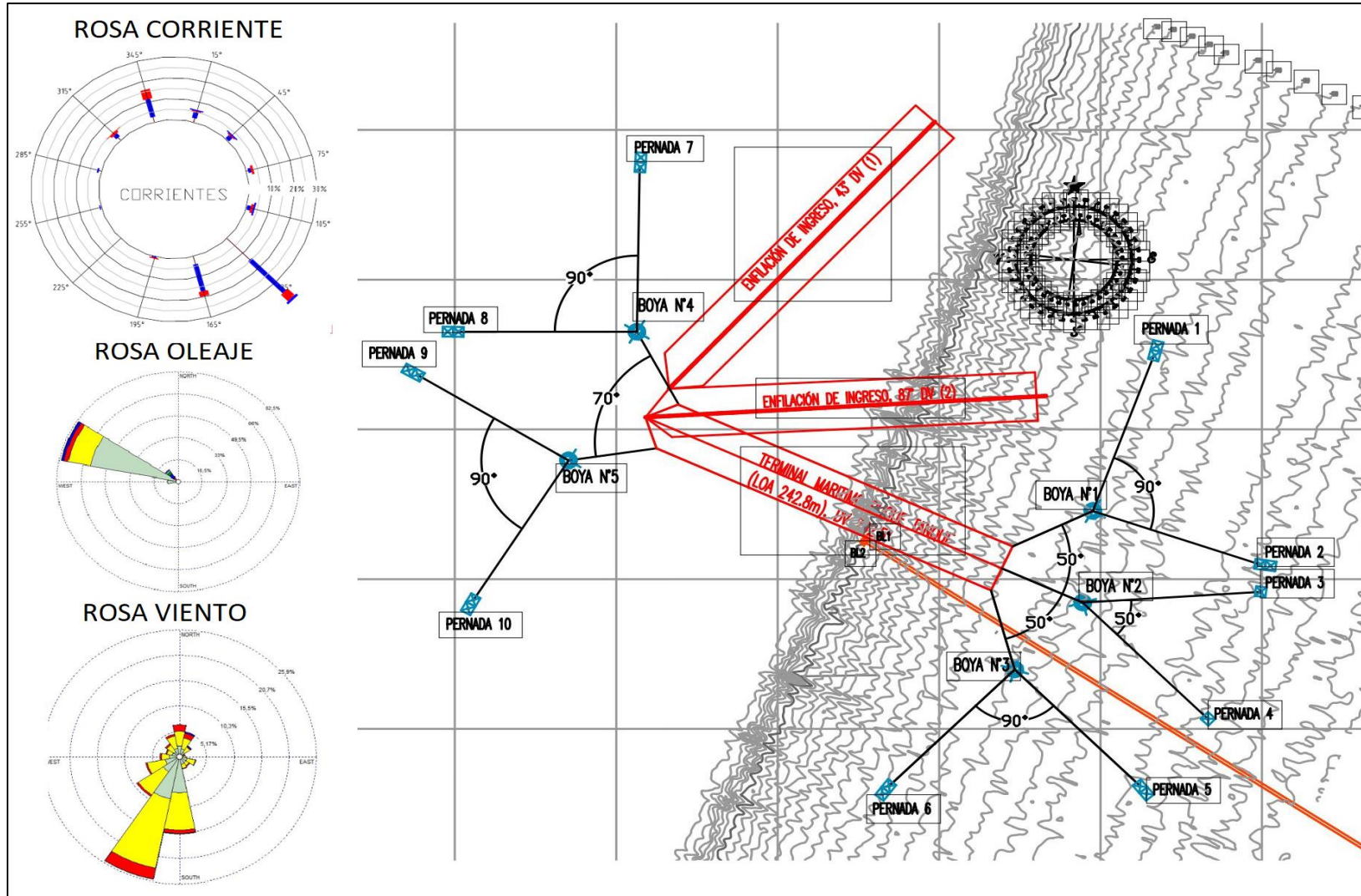
Boya de amarre N°5, amura babor; la cual debe ser amarrada con una espía de 2 paños. Dos pernadas de trabajo con apertura de 90°, con muerto de término. Una retenida, con 2 paños de cadena y muerto de fijación. La apertura entre las boyas N°4 y N°5 es de 70°. La Figura 5.15 presenta en detalle esta alternativa de layout con el buque LOA 242.8 m orientado en dirección al oleaje reinante WNW (292.5° DV), con 5 boyas de amarre. La Tabla 5.13 muestra las profundidades aproximadas respecto al NRS de los elementos de amarre para la alternativa 3.

Tabla 5.13. Profundidades de los elementos de amarre y fondeo alternativa 3

ELEMENTO	PROFUNDIDAD NRS [m]
BOYA N°1	-14
PERNADA 1	-14
PERNADA 2	-9
BOYA N°2	-13
PERNADA 3	-9
PERNADA 4	-9
BOYA N°3	-14
PERNADA 5	-10
PERNADA 6	-16
BOYA N°4	-34
PERNADA 7	-35
PERNADA 8	-35
BOYA N°5	-34
PERNADA 9	-35
PERNADA 10	-34

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.15. Alternativa layout nave LOA 242.8, ABM con 5 boyas de amarre



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.3.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

La Tabla 5.14 presenta la matriz determinación de los pesos globales que se dan a cada alternativa. Esta matriz se obtuvo mediante los valores del vector promedio para las alternativas i, ii y iii según los valores que se asignaron para cada criterio a través de la escala numérica de Saaty (del 1 al 9) por el método AHP (nivel jerárquico 3) y la ponderación de factores para el nivel jerárquico 2 (en amarillo), donde:

- A: Criterio de costo de obra
- B: Criterio de seguridad de operación
- C: Criterio de impacto en el sitio
- D: Criterio de factibilidad constructiva
- E: Criterio de mantención

Tabla 5.14. Matriz de selección de alternativas mediante método AHP

Alternativa	Criterios analizados					Priorización
	A	B	C	D	E	
i	0.69	0.72	0.10	0.71	0.60	0.524
ii	0.11	0.19	0.62	0.20	0.20	0.269
iii	0.22	0.08	0.28	0.09	0.20	0.212
Ponderación	0.50	0.13	0.27	0.03	0.07	

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El resultado de dicha matriz o priorización de alternativa se obtiene mediante la suma producto entre la matriz formada por la ponderación de factores entre el nivel jerárquico 2 y el nivel jerárquico 3.

En el ANEXO C se presentan tanto la matriz de comparación por “parejas” para el nivel jerárquico 2 y las matrices de comparación por “parejas” para el nivel jerárquico 3.

La mejor alternativa que se evaluó según la matriz multicriterio mediante el método AHP, fue la **alternativa (i)**, la cual resultó ser la más económica y factible en términos de construcción y mantención.

OCIMF (2010) aconseja una disposición de atraque con un número mínimo de boyas, ya que normalmente resulta el esquema más económico y viable. Los sistemas con un mayor número de boyas son difíciles de controlar y puede conducir a la sobrecarga de una sola boya y la pérdida adicional de las conexiones de la boya. Por lo que está bien justificado seleccionar la alternativa 1 con un menor número de boyas de amarre.

5.3.4 TRAZADO CAÑERÍAS SUBMARINAS

Para la transferencia de petróleo y abastecimiento de planta, el terminal marítimo está compuesto de los siguientes elementos:

- Dos (02) cañerías rígidas de acero, una para productos livianos y otra para productos pesados. Ambas tienen un largo aproximado de 487 [m] definida desde la zona intermareal, zona en la que las cañerías se conectan al proyecto terrestre hasta el veril de los 30 [m], ya que a esta profundidad se ubicaría el manifold del buque tanque el

cual hace el trasvase de productos. La dirección de las cañerías rígidas es de 312° con respecto al norte definida según el promedio direccional del clima extremo de oleaje (ver sección 5.1.1.3). La separación de las cañerías será de dos metros entre sí según art 216 Decreto 160 (2009).

- Dos (02) líneas de flexibles, una para cada cañería rígida, las cuales se mantendrán en el fondo marino y son conectadas en cada extremo de las cañerías.
- Dos (02) boyarines de levante en el extremo de cada cañería rígida, así como del inicio de línea de flexibles, los cuales tienen la función de levantar del fondo marino los flexibles mediante grúas propias del buque.

5.4 CÁLCULO DE FONDEO

5.4.1 CÁLCULO DE CARGAS SOBRE EL BUQUE

A continuación, se presenta el cálculo de las naves LOA 242,8 [m]. El análisis se realizó en la posición final de las naves y bajo la acción de las fuerzas de viento, corriente y olas.

Primero, se determinaron las fuerzas oceanográficas de viento, corriente y olas, actuantes sobre la nave. Posteriormente, se verificó que la resistencia del sistema de boyas de amarre sea superior a la calculada para las condiciones oceanográficas y de viento consideradas. Finalmente, se realizó la verificación del sistema de anclaje propio de la nave a proa.

ROM 3.1-99 (2000) recomienda para maniobras de aproximación y amarre de terminales multiboya una velocidad absoluta del viento de 20 nudos. Sin embargo, y para efectos de seguridad del terminal marítimo, se consideró que el buque debe resistir 30 nudos de velocidad de viento para que éste aguante amarrado en las boyas. De esta forma el sistema de fondeo está hecho con mayor una velocidad que la obtenida en el downtime operacional de vientos para resistir mayor carga.

Se consideró una altura de ola de operación $H_s = 1.5$ [m] según recomendación de OCIMF (2010) y un período típico $T_p = 13$ [s] obtenido del análisis de clima medio de ola en el sitio de interés. Cabe destacar que el cálculo de fondeo está hecho para que el buque resista las condiciones operativas descritas en el downtime operacional. En casos extremos de oleaje el terminal no puede operar.

En la Tabla 5.15 se presentan los parámetros oceanográficos a considerar para el cálculo de fuerzas sobre la nave.

Tabla 5.15. Parámetros oceanográficos para fuerzas sobre la nave

Intensidad del viento	30 nudos (15.44 m/s)	Rachas de viento (1 min)
Ángulos de incidencia del viento sobre la nave	0-30-60-90-120-150-180-210-240-270-300-330	Ángulos al eje de crujía
Intensidad de corriente	0.5 nudos (0.26 m/s)	Sección 4.2.3
Ángulo de incidencia de la corriente sobre la nave	20°	Sección 5.1.2
Altura de ola	1.5 m	Sección 4.2.1
Período de ola	13 s	Sección 5.1.1.2
Ángulo de incidencia del oleaje sobre la nave	22.5°	303.75-281.25 (rango dir WNW)
Amplitud de marea	2 m	Sección 5.1.3

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En el ANEXO D se detalla el procedimiento y resultados de las cargas oceanográficas sobre el buque de diseño.

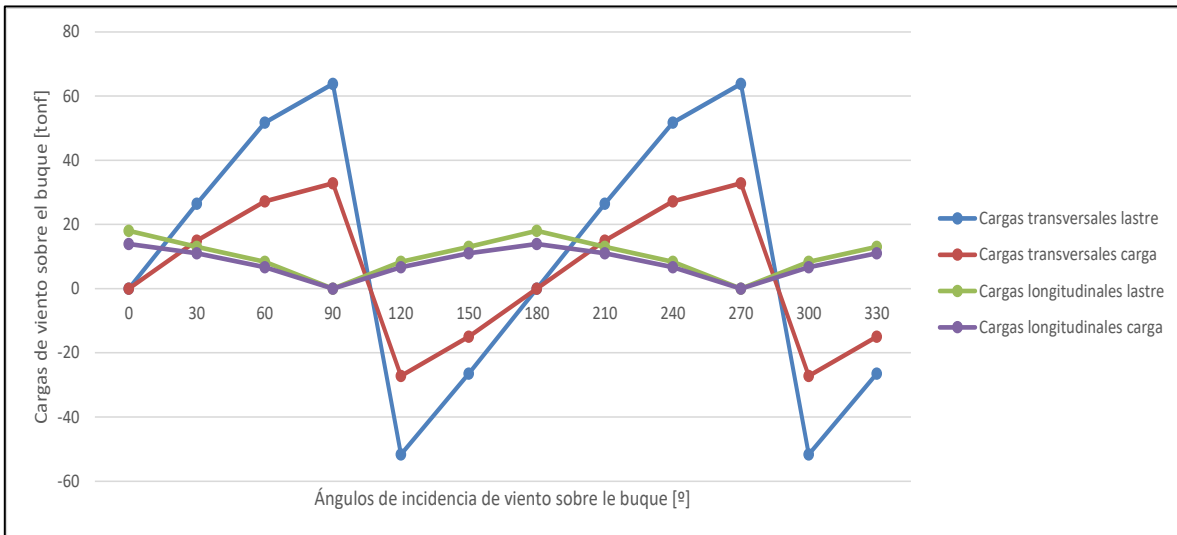
La Tabla 5.16 presenta un resumen de las fuerzas y momentos sobre el buque tanto en carga como en lastre y la Figura 5.16 presenta los resultados gráficamente de las fuerzas y momentos por vientos para todos los ángulos de incidencia sobre el buque tanto en lastre como en carga.

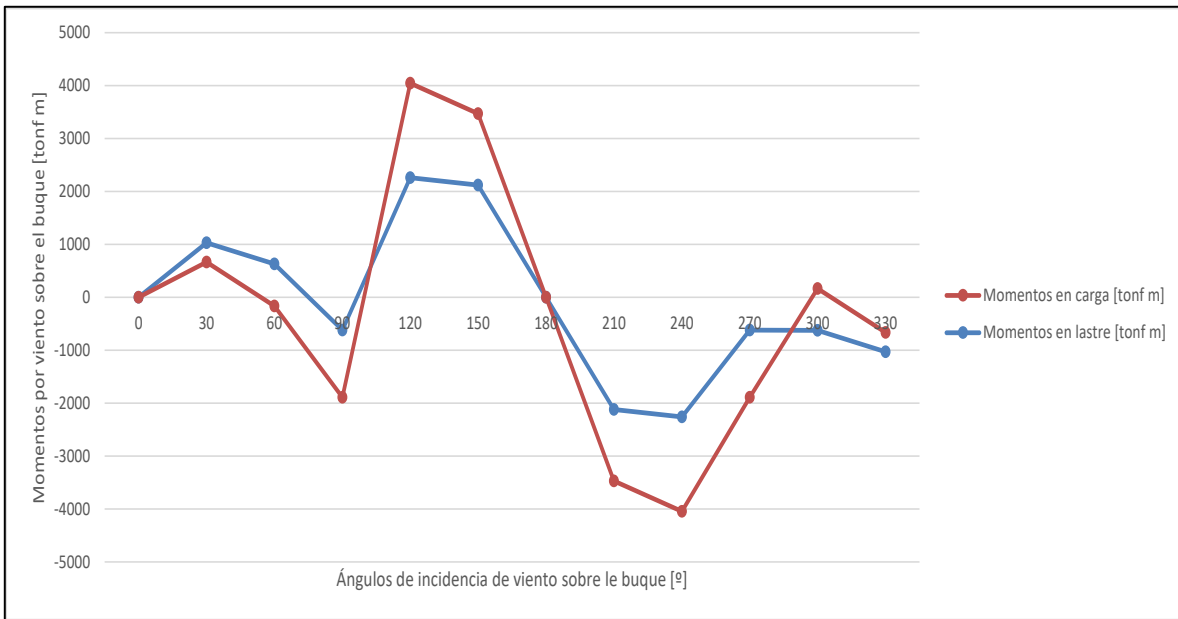
Tabla 5.16. Fuerzas y momentos sobre el buque en lastre y en carga

Cargas de viento [°]	Fuerzas sobre el buque [tonf]				Momento [tonf m]	
	Transversales		Longitudinales		Lastre	Carga
	Lastre	Carga	Lastre	Carga		
0	0	0	18	13.9	0	0
30	26.5	15	13	11	1028.8	-364.2
60	51.7	27.2	8.4	6.7	627.7	-793.5
90	63.8	32.8	0	0	-620	-1272.3
120	-51.7	-27.2	8.4	6.7	2259.6	1785.3
150	-26.5	-15	13	11	2121.9	1347.4
180	0	0	18	13.9	0	0
210	26.5	15	13	11	-2121.9	-1347.4
240	51.7	27.2	8.4	6.7	-2259.6	-1785.3
270	63.8	32.8	0	0	-620	-1272.3
300	-51.7	-27.2	8.4	6.7	-627.7	793.5
330	-26.5	-15	13	11	-1028.8	364.2
Cargas de presión de corrientes	1	4.6	0.5	1.8	16.9	146.5
Cargas de fricción de corrientes	0.013	0.013	0.129	0.165		
Cargas de oleaje	0.2	1	0.4	2		

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.16. Fuerzas y momentos por viento sobre el buque en lastre y en carga





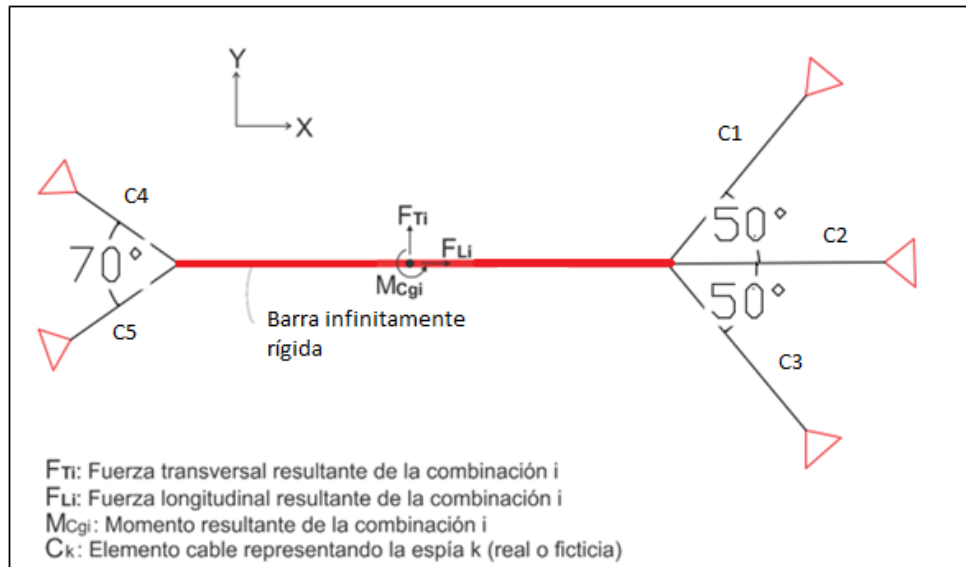
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.4.2 CÁLCULO DE CARGAS SOBRE LOS ELEMENTOS DE AMARRE

Una vez obtenidas las cargas oceanográficas, estas fueron cargadas al modelo SAP2000 para generar una envolvente de combinaciones de carga para cada elemento de amarre del buque tanque.

La Figura 5.17 presenta un esquema del modelo de sistema de amarre para la nave.

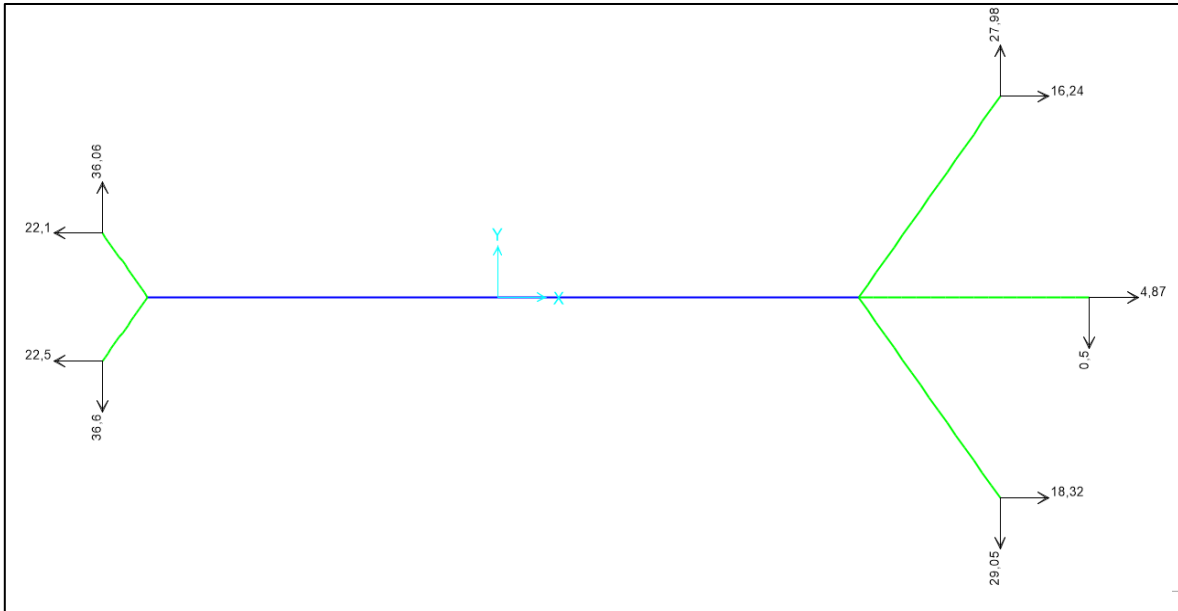
Figura 5.17. Modelo de sistema de amarre para la nave



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La Figura 5.18 muestra las máximas fuerzas en las boyas y anclajes, en unidades tonf, resultantes de la envolvente de las combinaciones de carga detalladas según la metodología propuesta en la sección 4.4.

Figura 5.18. Resultantes de la envolvente de las combinaciones de carga (tonf)



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La Tabla 5.17 se presentan las fuerzas en los puntos de amarre, las cuales tienen que ser resistidas por las boyas y por las anclas.

Tabla 5.17. Fuerza de amarre-LOA 242.8 -Modelo SAP2000

Punto de amarre	en X [tonf]	en Y [tonf]
Aleta estribor	16.24	27.98
Popa	4.87	0.5
Aleta babor	18.32	29.05
Amura estribor	22.1	36.06
Amura babor	22.5	36.6

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.4.3 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE FONDEO

En el ANEXO E se presenta la verificación de todos los elementos de fondeo del terminal marítimo. La Tabla 5.18 muestra un resumen de los cálculos obtenidos de los elementos de fondeo a utilizar para las boyas 1,2 y 3.

Tabla 5.18. Resumen de configuraciones calculadas para las boyas de amarre

Elementos de fondeo	BOYAN°1		BOYAN°2		BOYAN°3	
	Pernada N°1	Pernada N°2	Pernada N°3	Pernada N°4	Pernada N°5	Pernada N°6
Largo orinque [m]	20.1		19		19	
N° Paños de cadena	3	3	3	3	3	3
Diámetro cadena Grado 2 [pulg]	3-1/16"	3-1/16"	1-1/8"	1-1/8"	3-1/8"	3-1/8"
Carga rotura cadena [lbf]	705000	705000	105000	105000	732000	732000
N° Muertos de término	2	2	1	1	2	2
Peso muerto de término [tonf]	42.5	42.5	12.5	12.5	43.8	43.8
Peso sumergido muerto de término [tonf]	25.1	25.1	7.4	7.4	25.8	25.8
Capacidad de resistencia muerto de término [tonf]	34.6	36.6	5.1	5.1	35.6	35.6
Reserva de boyantez boya [lbf]	50000		10000		50000	

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La

Figura 5.19, Figura 5.20 y Figura 5.21 muestran un esquema en planta de las boyas de amarre con sus respectivas pernadas de trabajo y retenida.

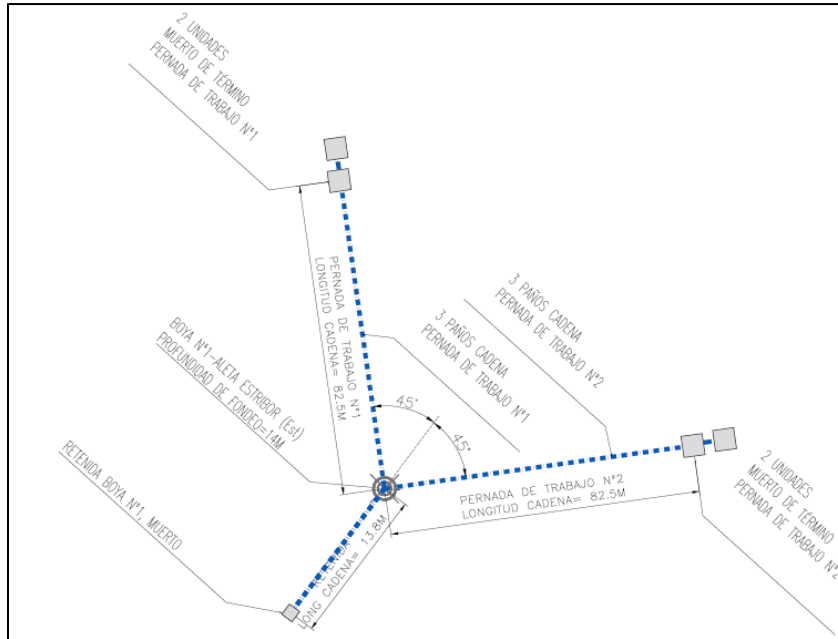
Los muertos de término de las pernadas de trabajo serán tipo "Wedge", para que su centro de gravedad se cargue al costado donde las cargas deben ser resistidas. Estos serán dotados de cáncamos de acero en la parte superior para que sean manipularlos mediante grúas y darles una correcta instalación, y en los costados para conectarlos a la cadena principal y para ser conectados con el otro muerto para que trabajen en conjunto (Boya N°1 y Boya N°3).

Tanto los muertos de término como la retenida contienen "Shear keys" en la base por todo el perímetro, los cuales aportan cerca de un 10% adicional de resistencia según NAVFAC (2012).

La Figura 5.22, Figura 5.23 y Figura 5.24 muestran el dimensionamiento de los muertos de término para cada una de las pernadas de trabajo. La Figura 5.25, Figura 5.26 y Figura 5.27 muestran el dimensionamiento de las retenidas tipo "Sinker" para cada una de las boyas.

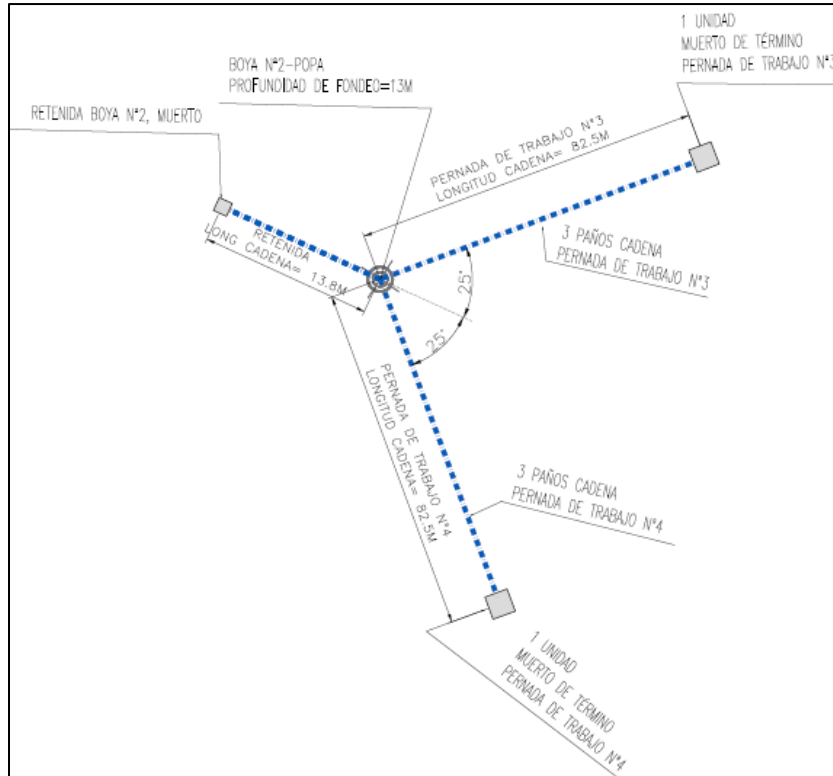
En la Tabla K.1, Tabla K.2 y Tabla K.3 se presenta en detalle los elementos de fondeo a utilizar para cada una de las boyas de amarre, y la Figura K.1, Figura K.2, Figura K.3, Figura K.4, Figura K.5 y Figura K.6 muestran la configuración de cada una de las boyas (ver ANEXO K).

Figura 5.19. Planta configuración Boya N°1



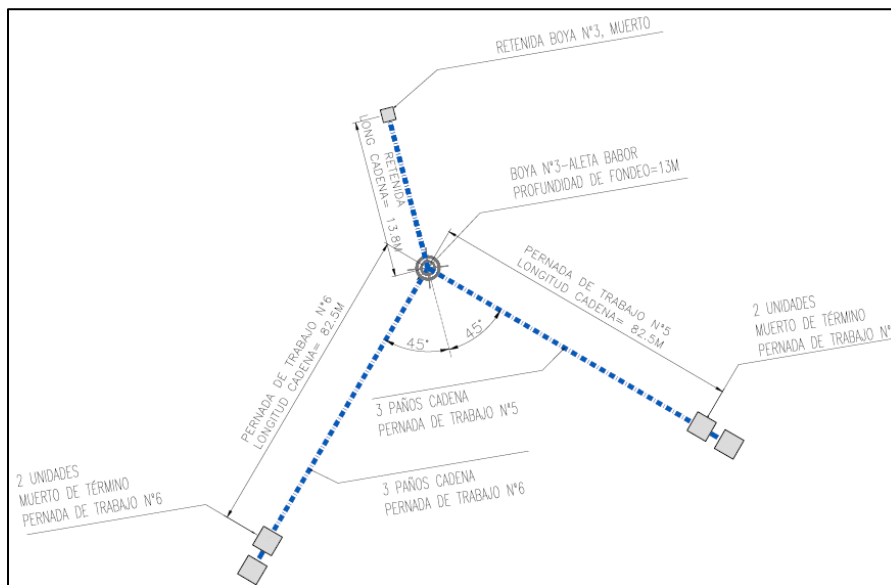
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.20. Planta configuración Boya N°2



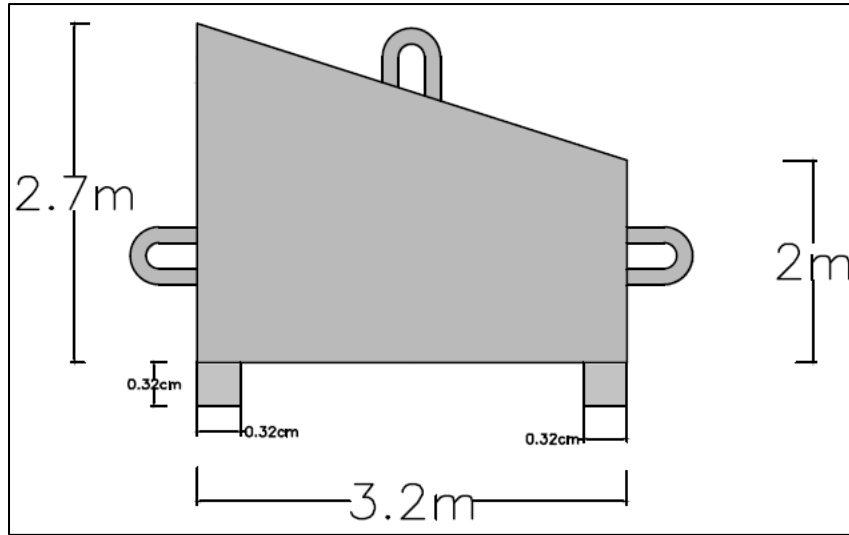
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.21. Planta configuración Boya N°3



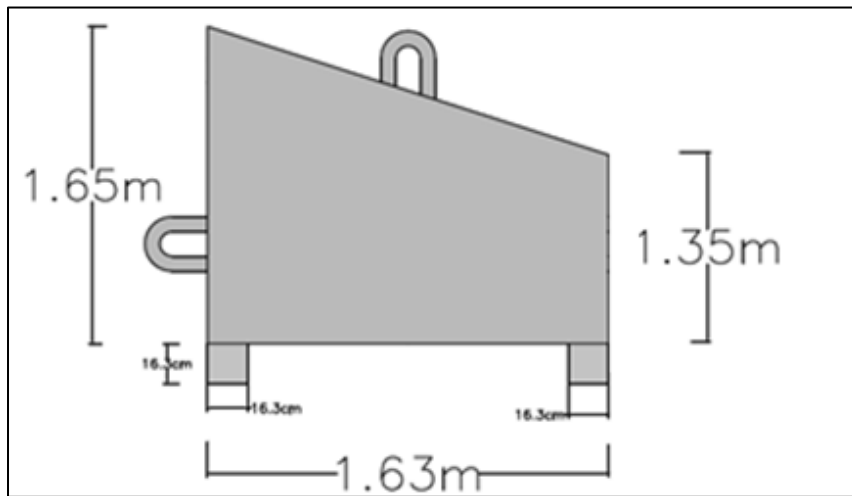
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.22. Configuración muerto de término pernada 1 y 2



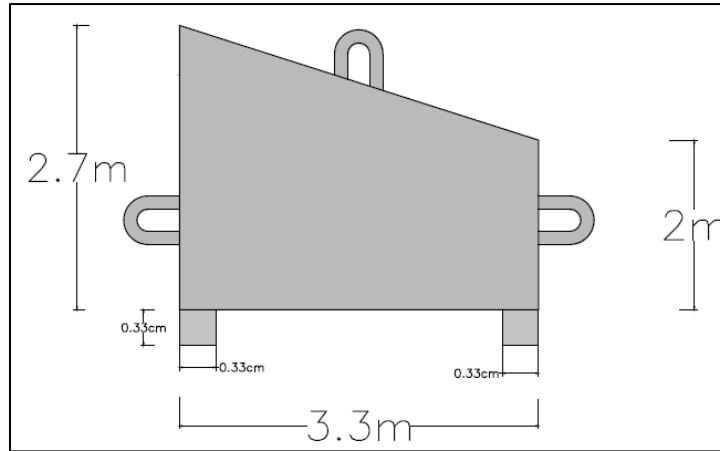
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. OBS: ANCHO PAREDES= 2.2M

Figura 5.23. Configuración muerto de término pernada 3 y 4



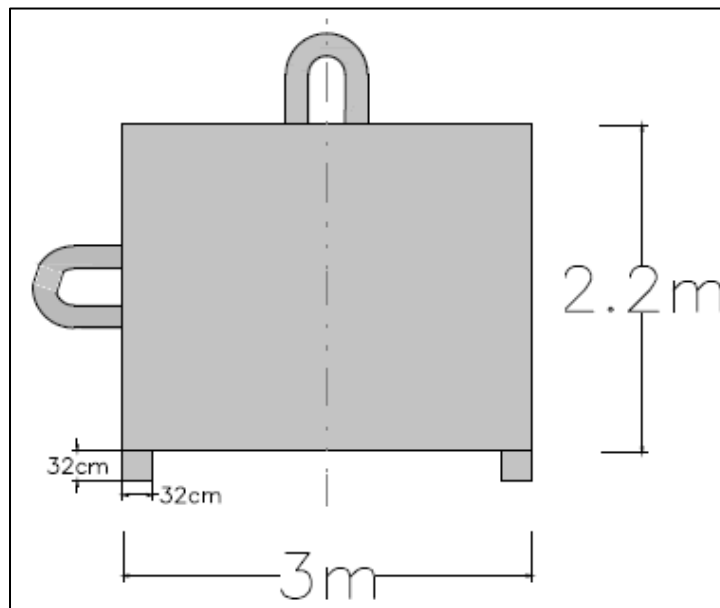
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. OBS: ANCHO PAREDES= 2M

Figura 5.24. Configuración muerto de término pernada 5 y 6



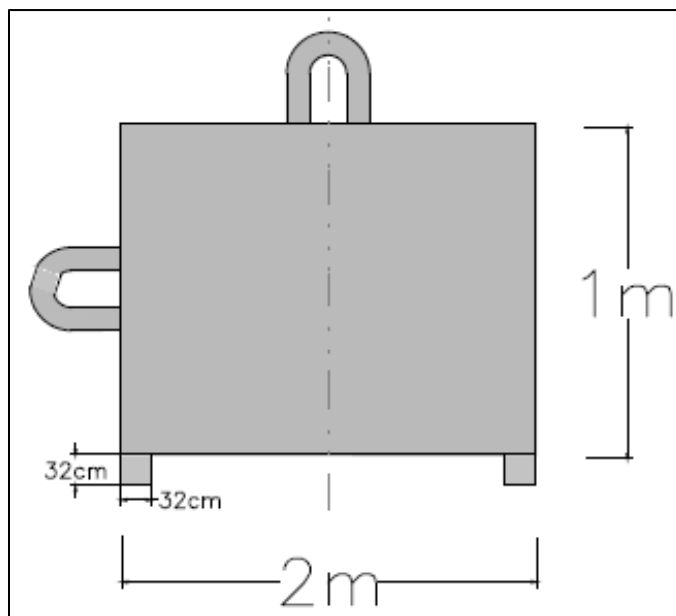
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. OBS: ANCHO PAREDES= 2.2M

Figura 5.25. Configuración retenida Boya N°1



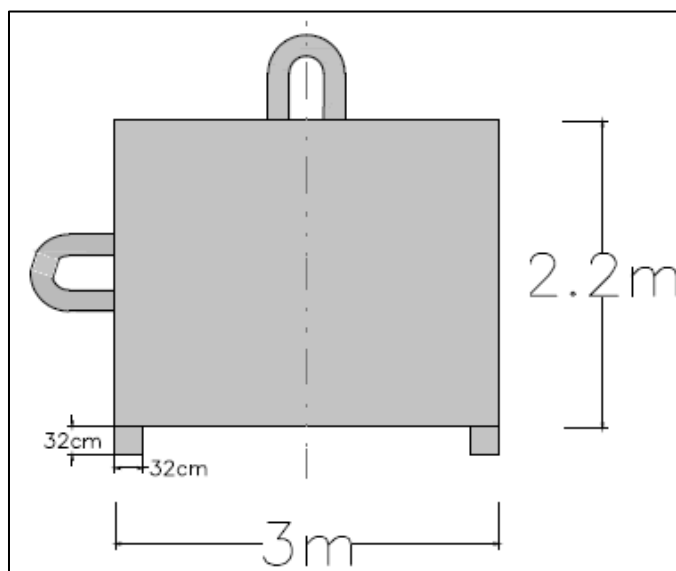
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. OBS: ANCHO PAREDES= 2.5M

Figura 5.26. Configuración retenida Boya N°2



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. OBS: ANCHO PAREDES=2.25M

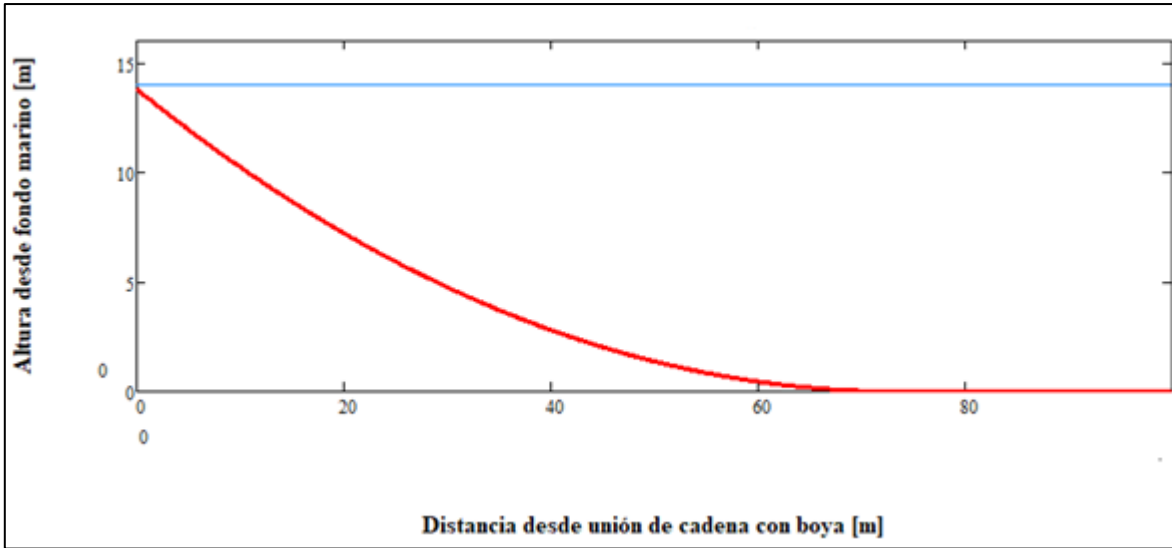
Figura 5.27. Configuración retenida Boya N°3



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. OBS: ANCHO PAREDES=2.57M

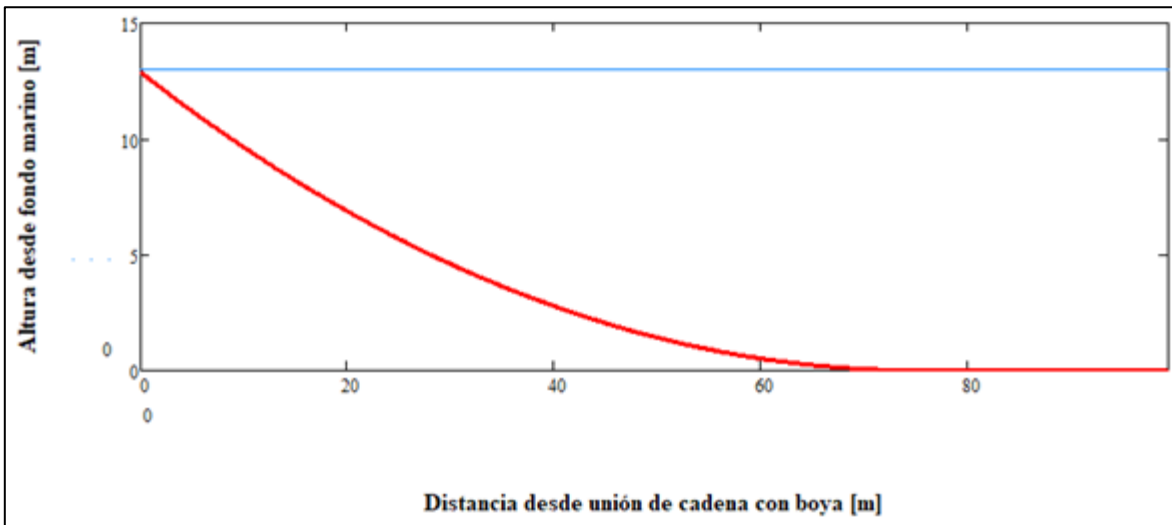
La Figura 5.28, Figura 5.29 y Figura 5.30 muestran las catenarias que se forman bajo acción de la carga de diseño en las Boyas N°1, Boyas N°2 y Boyas N°3 respectivamente, y la Figura 5.31 y Figura 5.32 muestran las catenarias que se forman por acción de la carga de diseño en el anclaje amura babor y amura estribor respectivamente.

Figura 5.28. Catenaria de cadena suspendida Boya N°1



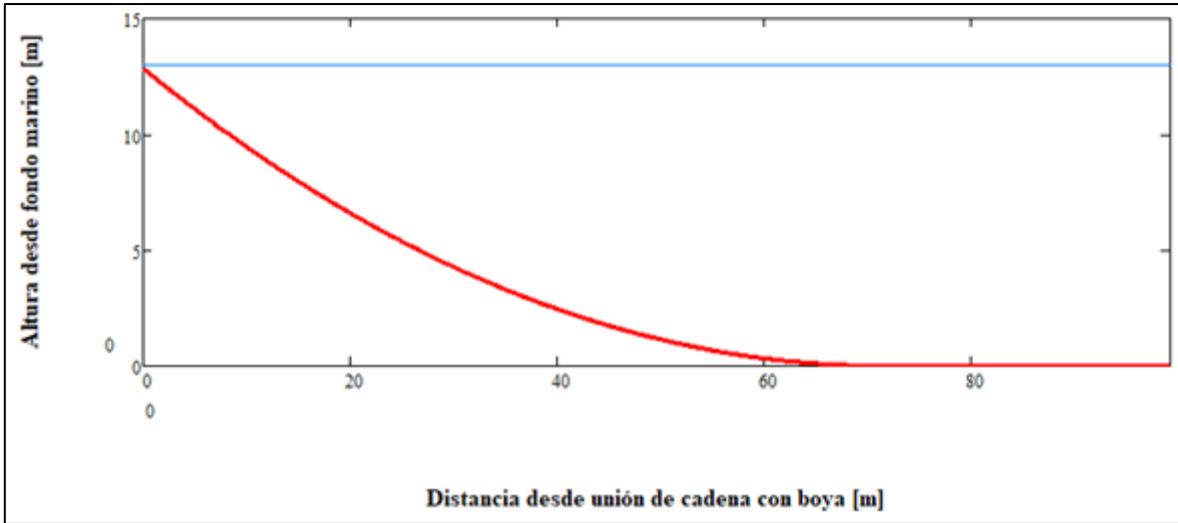
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.29. Catenaria de cadena suspendida Boya N°2



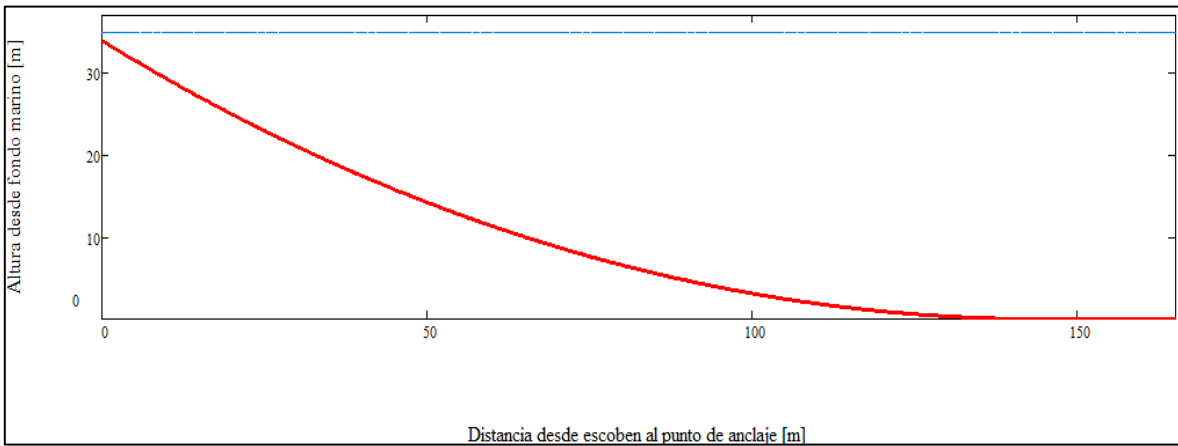
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.30. Catenaria de cadena suspendida Boya N°3



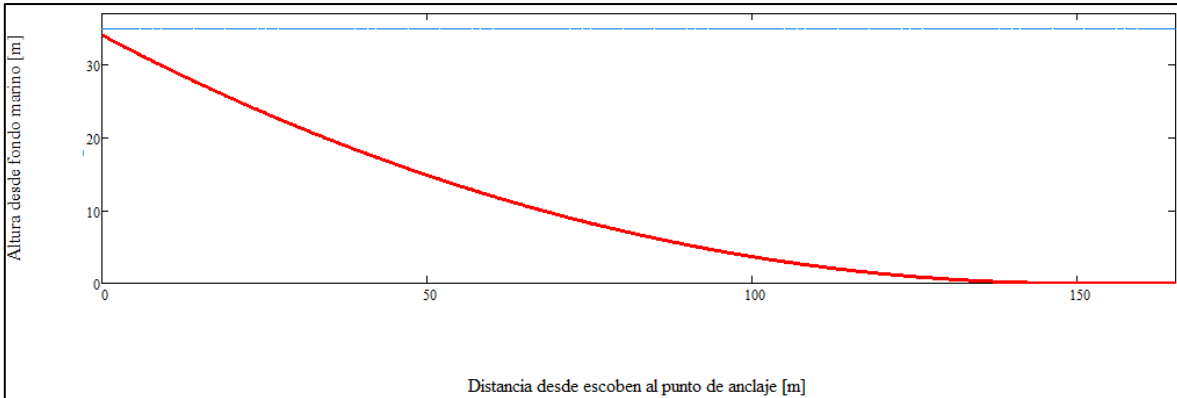
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.31. Catenaria de cadena suspendida ancla amura babor



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.32. Catenaria suspendida ancla amura estribor



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Según ROM 3.1-99 (2000) los anclajes se comportan con máxima eficiencia cuando la cadena ejerce sobre ella una tracción horizontal o paralela al fondo marino.

La Tabla 5.19 muestra cómo disminuye la capacidad de agarre en función de la inclinación que la cadena forma con el fondo marino.

Tabla 5.19. Poder de agarre vs ángulo de inclinación de cadena

Ángulo de inclinación:	0°	5°	10°	15°
% del máximo poder de agarre:	100%	80%	60%	40%

FUENTE: ROM 3.1-99 (2000)

A partir de todos los cálculos obtenidos en el ANEXO E, se puede apreciar que para todas las boyas a popa y anclajes a proa se forma un ángulo menor a 2° entre cadena/muerto y cadena/ancla, por lo cual se verifica que los anclajes funcionan con máxima eficiencia.

En el ANEXO I se presenta la ficha técnica de cadenas de fondeo, y en el ANEXO J se presenta la ficha técnica de las boyas de amarre a utilizar en el terminal marítimo.

5.5 DISEÑO DE LÍNEA DE TRANSFERENCIA DE PETRÓLEO

5.5.1 CARACTERÍSTICAS CAÑERÍAS SUBMARINAS RÍGIDAS

En la superficie del lecho marino, se dispondrán dos cañerías para transferencia de petróleo, espaciadas 2 [m] entre sí para permitir la correcta instalación con los muertos de fijación y sujeción de las mismas. La cañería sur se utilizará para transferencia de combustibles pesados Clase III: Petróleos Combustibles, PC N°6, PC N°5, IFOs, mientras que la línea norte se para transferencia de Combustibles Livianos Clase I: Gasolina 93 Octanos, Gasolina 97 Octanos y Combustibles Livianos Clase II: Petróleo Diésel, Kerosene. Las cañerías se disponen de manera paralela con un rumbo de 312° respecto al norte, perpendicular al oleaje dominante de acuerdo al análisis de clima extremo en la sección 5.1.1.3.

El trazado de dichas cañerías se contempla desde la zona intermareal donde serían conectadas con el proyecto terrestre hasta la altura del manifold del buque tanque, cercano al veril de los 30 [m] de profundidad.

Las cañerías de acero serán recubiertas con fibra de vidrio reforzado de 6 mm de espesor, para protección pasiva ante la corrosión.

La Tabla 5.20 presentan las características de las cañerías submarinas proyectadas.

Tabla 5.20. Características cañerías submarinas rígidas

Cañería	Tipo de acero	Largo [m]	Diametro externo [pulg]	Espesor de pared [mm]	Peso [kgf/m]
Norte	ASTMA 53/106 SCH.40/Gr B	487	14	11.1	94.204
Sur	ASTMA 53/106 SCH.40/Gr B	487	14	11.1	94.204

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ANEXO F

En el ANEXO N se presenta la verificación de estabilidad de las cañerías submarinas propuestas.

5.5.2 MONTAJE Y LANZAMIENTO AL MAR DE LAS CAÑERÍAS SUBMARINAS

A continuación se realizó un resumen de los principales puntos de las especificaciones técnicas especiales de la instalación de las cañerías submarinas del proyecto terminal marítimo El Bato en Quintero que el año 2004 la empresa SAIMIC LTDA ejecutó, las cuales son igualmente aplicables para el presente proyecto.

Las cañerías deberán ser armadas en terreno, de forma tal que se asegure la estructuración de cada ducto de forma integral, adecuando las pendientes y las imperfecciones del terreno para su correcto desplazamiento. Se requerirá realizar un chequeo del terreno incluyendo el fondo marino, para efectuar el montaje de las cañerías.

Una vez que las cañerías están soldadas y revestidas, se deberá efectuar la instalación de polines a través de los cuales las cañerías se deslizarán para posteriormente ser lanzadas al mar. Estos polines deberán ser de goma para lograr una curvatura suave de las cañerías al momento del lanzamiento a la zona de playa. La distancia entre polines deberá ser entre 5 a 6 [m].

Una vez que se haya coordinado la faena marítima y las cañerías estén en posición, se procederá al lanzamiento.

La maniobra de lanzamiento deberá consistir en a lo menos lo siguiente:

- Una embarcación para efectuar el tiro de las cañerías desde el mar.
- Una embarcación para actuar como retenida cuando las cañerías ingresen al mar.
- Dos embarcaciones menores que colaboren desde los costados para “carnear” o apoyar las cañerías por sus costados. Estas embarcaciones deberán estar provistas de neumáticos para que impidan dañar la protección de las cañerías.
- Pay-loander u otro equipo en terreno para aguantar la cañería mientras ingresa al mar.
- Una embarcación menor para el desplazamiento rápido con un equipo de buzos de apoyo en caso de emergencia, con equipos adecuados para estas funciones.
- Un equipo de buzos que instalen los flotadores mientras las cañerías ingresan al mar.

El procedimiento de lanzamiento deberá realizarse a velocidades no mayores de 12 metros por minuto, con apoyo permanente del Pay-loander en tierra, de manera tal que efectúe la maniobra de retenida para asegurar que las cañerías entren controladamente al mar. La maniobra de lanzamiento deberá ser realizada con vientos menores a 4 nudos.

Las cañerías deberán ser remolcadas traccionando desde su extremo que será unido en el mar a tierra, por lo cual, su extremo de unión a tierra quedará en la popa del remolque. Se deberá tener un track de navegación con esquema de salida, navegación y llegada al punto. Se deberá instalar polín de deslizamiento en el sector de rompiente del terminal marítimo. El polín deberá estar debidamente asegurado en el fondo marino, para permitir el libre desplazamiento de las cañerías sobre éste.

Una vez recibidas las cañerías en tierra, se asegurarán convenientemente para no producir desplazamientos en la zona intermareal.

Se deberá disponer de personal de apoyo y equipamiento en el sector de playa para traccionar las cañerías y recibir el cable de tiro en tierra, teniendo especial cuidado que estas no rocen con formaciones de roca en la orilla.

Las cañerías de acero $\Phi 14''$ no flotan, por lo cual se instalarán con flanges de sello y aire, apoyadas por flotadores. Para imprimirle boyantes positiva a las cañerías de forma tal que aseguren el traslado entre el punto de lanzamiento y el sector de fondeo, se emplearán tambores estándar de 200 litros metálicos, los cuales irán actuando en pares. Los tambores deberán estar espaciados longitudinalmente a 15 [m] como máximo, para permitir que ante una emergencia por rotura o desprendimiento de éstos, no se generen fuerzas de hundimiento que flecten las cañerías.

Los tambores que actuarán en pares, con un cáncamo de amarre mediante el cual se pasará un polipropileno que asegurará la unión de ambos tambores por debajo de las cañerías.

Los tambores se irán instalando en el mar una vez que las cañerías son lanzadas al mar mediante una maniobra rápida con personal adiestrado en faena. El personal de buzos deberá contener material de corte rápido a mano para proceder a cortar aquellos tambores que se inundan de agua por falla repentina, de modo que se libere la cañería de un peso adicional.

En el proceso de remolque se deberá controlar el posicionamiento de los tambores, evitando que por efecto de vientos o corrientes, tiendan a desplazarse los pares de tambores hacia atrás, modificando las distancias entre pares contiguos de flotadores.

El hundimiento de las cañerías se realizará desde el mar hacia a tierra. Este hundimiento será controlado soltando los flotadores en forma tal que la curvatura de la cañería no exceda el límite de tolerancia, procediendo a su inundación y posición sobre el lecho marino. Esto se logra mediante el apoyo de embarcaciones auxiliares y equipo de buzos especialistas.

Una vez enfrentados el extremo de la cañería con flange y la cañería instalada en el sector de playa (proyecto terrestre), se efectuará el corte definitivo para adicionarle el flange de unión.

En esta unión se deberá tener especial cuidado para lograr un correcto alineamiento y paralelismo entre las caras de los flanges. Esto se logra mediante el correcto y adecuado empleo de gatas mecánicas, debiéndose extremar las medidas de seguridad con los operadores y el recubrimiento de la cañería.

El sistema de fondeo de las cañerías submarinas considera muertos tipo montura, que fijará las cañerías en el punto, evitando las fuerzas de arrastre y levante producidos por las corrientes y el oleaje incidente.

Los muertos no sólo trabajarán por su peso propio, sino que también contarán con un efecto de succión en sus bases por lo que es esperable un incremento de su peso, obteniéndose como resultante un efecto de seguridad mayor a lo calculado.

5.5.3 DISEÑO DE MUERTOS DE FIJACIÓN

El muerto a diseñar para utilizar como elemento de fijación de las cañerías submarinas al fondo marino será de tipo tronco piramidal, debido a su buena capacidad de agarre y su capacidad de resistencia al volcamiento en casos extremos.

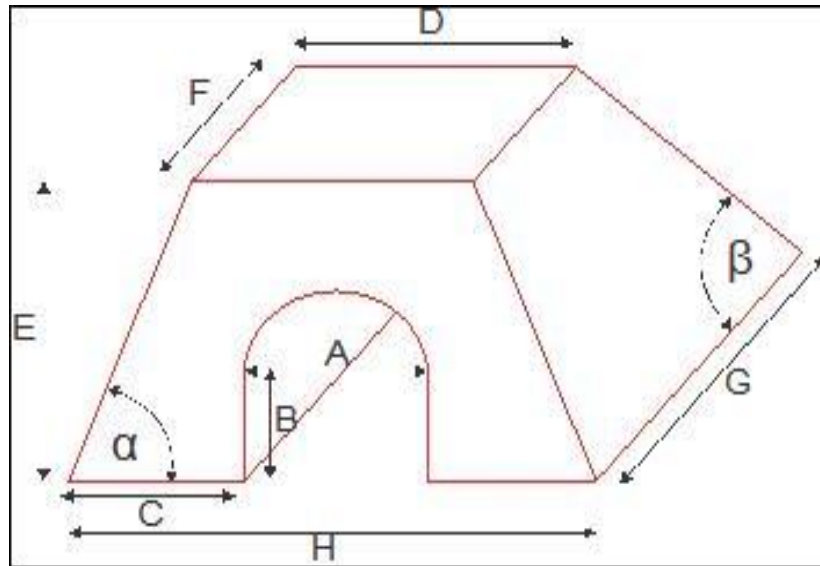
Estos muertos son tipo montura, es decir son colocados una vez que la cañería submarina es lanzada al mar, y colocadas en los sitios indicados en los planos mediante flotadores.

Los muertos de fijación serán de hormigón calidad H-30 de alta calidad en cuanto a impermeabilidad y de la máxima compacidad para obtener un gran peso específico, cercano a 2.4 tonf/m³. Estos serán dotados de un cáncamo de acero para su instalación. Las barras de refuerzo serán estriadas de calidad A630-420H el cual deberá cumplir con lo especificado en las Normas Chilenas, según recomendación de DOP (2013) para obras marítimas.

5.5.3.1 DIMENSIONES DEL MUERTO DE FIJACIÓN

En la Figura 5.33 se muestra esquemáticamente las características del muerto de fijación tipo tronco piramidal y la Tabla 5.21 las dimensiones del muerto de fijación.

Figura 5.33. Esquema muerto tipo tronco piramidal



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tabla 5.21. Dimensiones muerto de fijación

A	0.42	m
B	0.42	m
C	0.42	m
E	0.98	m
D	0.54	m
F	0.65	m
G	1.36	m
H	1.25	m
α	70	°
β	70	°

Volumen tronco piramidal	0.92	m ³
Volumen cilindro interior	0.25	m ³
Volumen total	0.67	m ³
Peso muerto (PL)	1.7	tonf
Empuje muerto (EL)	0.69	tonf

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En el ANEXO L se presenta el procedimiento de cálculo para definir las dimensiones propuestas para los muertos que serán instalados a lo largo las cañerías submarinas.

5.5.3.2 CÁLCULO DE LAS CARGAS CONSIDERADAS

i. Peso propio

Peso unitario cañería con hidrocarburo	0.17	tonf/m
Peso muerto de fijación	1.7	tonf

ii. Fuerza hidrostática

Empuje de la cañería	0.11	tonf/m
Empuje muerto de fijación	0.69	tonf

iii. Fuerzas hidrodinámicas

Se utilizó una altura de ola con un período de retorno de 100 años de $H_s=7.31$ [m] y el caso más desfavorable del análisis de clima extremo que pertenece a la dirección 329° (sección 5.1.1.3), por lo tanto, se consideró para el cálculo del espaciamiento entre muertos de fijación las cargas en esta dirección.

La altura de ola varía a lo largo de la cañería. Para esto se utilizó la T.L.O (Teoría lineal del oleaje) asumiendo veriles rectos y paralelos. Además se aplicó el criterio de rompiente propuesto por McCowan (1891).

En la Tabla 5.22 se presentan los parámetros oceanográficos considerados para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas sobre la cañería.

Tabla 5.22. Parámetros oceanográficos considerados

Celdas en naranja corresponden a datos de entrada				
Parámetro	Término	Valor	Unidad	
Altura de ola $T_r=100$ años	H_o	7.31	m	Sección 5.1.1.3
Período de ola	T	13	s	Sección 5.1.1.4
Longitud de onda	L_o	264	m	
Angulo del oleaje	α	31	$^\circ$	Sección 5.1.1.4
Coefficiente de arrastre	CD	1.1		Figura CEM VI-5-139
Coefficiente de arrastre en rompiente	CD_r	2.75		Valor recomendado: $CD_r=2.5 \cdot CD$
Coefficiente de inercia	CM	2.0		Figura CEM VI-5-140
Coefficiente de lift	CL	0.2		Figura CEM VI-5-141
Marea	z_o	0	m NRS	Sección 5.1.3
Velocidad corriente	U corriente	0.099	m/s	Sección 5.1.2
Angulo incidencia ola respecto a la cañería	α_o	17	$^\circ$	$329^\circ-312^\circ$
Angulo incidencia corriente respecto a la cañería	α_c	222	$^\circ$	$312^\circ-90^\circ$
Densidad agua de mar	ρ	1025	kg/m ³	
Peso específico agua de mar	δ	1.025	tonf/m ³	
Peso específico del petróleo liviano	λ_{liq}	0.71	tonf/m ³	
Peso específico hormigon H30	λ_h	2.5	tonf/m ³	
Peso específico acero	λ_a	7.85	tonf/m ³	
Peso específico recubrimiento	λ_r	1.65	tonf/m ³	Fibra Vidrio Reforzada (FRP)

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Las fuerzas inducidas tanto por el oleaje como las corrientes sobre una cañería depositada en el fondo están dadas por las fórmulas de Morison et al. (1950), cuyos parámetros de cálculo son los siguientes:

$$\text{Fuerzas de arrastre: } F_m := \frac{1}{2} \cdot CD \cdot \rho \cdot (u \cdot \sin(\alpha_o))^2 \cdot D + \frac{1}{2} \cdot CD \cdot \rho \cdot (U \cdot \sin(\alpha_c))^2 \cdot D$$

$$\text{Fuerzas de levante: } F_L := \frac{1}{2} \cdot CL \cdot \rho \cdot (u \cdot \sin(\alpha_o))^2 \cdot D + \frac{1}{2} \cdot CL \cdot \rho \cdot (U \cdot \sin(\alpha_c))^2 \cdot D$$

$$\text{Fuerzas de inercia: } F_i := C_m \cdot \rho \cdot \frac{du}{dt} \cdot A \cdot \sin(\alpha_o)$$

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh[2\pi d/L]} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$\frac{du}{dt} \approx \frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh[2\pi d/L]} \sin\left(-\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Donde:

A: Área de por metro lineal de la cañería [m²/m]

D: Diámetro de la cañería con recubrimiento [m]

u: Velocidad máxima horizontal de la ola [m/s]

du/dt: Aceleración máxima horizontal de la ola [m/s²]

U: Velocidad de corriente horizontal [m/s]

V: Velocidad de corriente vertical [m/s]

Siendo:

H: Altura de la ola de diseño [m]

d: Profundidad del agua en el lugar [m]

z: Distancia al c.g. de la cañería medida desde la superficie (-) [m]

T: Período de la ola [s]

Lo: Longitud de onda en aguas profundas [m]

L: Longitud de la onda de la ola en el lugar [m]

CD: Coeficiente de arrastre

CM: Coeficiente de inercia

CL: Coeficiente de lift

La selección de coeficientes de fuerzas hidrodinámicas CD, CM y CL fueron obtenidos mediante los gráficos experimentales de Sarpkaya (1976) descritos en CEM VI-5 pt3 (2006) mediante los siguientes parámetros:

Máxima velocidad de ola horizontal	$u_m := 3.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	
Período de ola	$T_p := 13\text{s}$	
Diámetro de la cañería con recubrimiento	$D := 37\text{cm}$	
Viscosidad cinemática agua de mar a 15°C	$\nu := 1.141 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	
Número de Keulegan - Carpenter	$KC := \frac{u_m \cdot T_p}{D}$	$KC = 119.459$
Número de Reynolds	$Re := \frac{u_m \cdot D}{\nu}$	$Re = 1.103 \times 10^6$
Parámetro de frecuencia	$\beta := \frac{Re}{KC}$	$\beta = 9.229 \times 10^3$

En la Tabla 5.23 se presentan los resultados obtenidos para la propagación de oleaje mediante teoría lineal del oleaje (T.L.O) realizada profundidades entre los veriles 30 y 3 [m] de profundidad, mientras que en la Tabla 5.24 se presentan las cargas hidrodinámicas en la cañería.

Tabla 5.23. Velocidades máximas de ola y corriente por veril

Profundidad	H diseño	Condición	Fondo	Vel.horiz. Max z=-d	Ace.Horiz. Máx z=-d	Vel.corriente
d (m)	Hd (m)		z=-d [m]	u (m/s)	du/dt (m/s ²)	U(m/s)
30	6.5	Progresiva	-29.8	1.41	0.68	0.10
29	6.5	Progresiva	-28.8	1.45	0.70	0.10
28	6.5	Progresiva	-27.8	1.49	0.72	0.10
27	6.5	Progresiva	-26.8	1.54	0.74	0.10
26	6.5	Progresiva	-25.8	1.59	0.77	0.10
25	6.6	Progresiva	-24.8	1.64	0.79	0.10
24	6.6	Progresiva	-23.8	1.70	0.82	0.10
23	6.6	Progresiva	-22.8	1.76	0.85	0.10
22	6.6	Progresiva	-21.8	1.82	0.88	0.10
21	6.7	Progresiva	-20.8	1.89	0.91	0.10
20	6.7	Progresiva	-19.8	1.97	0.95	0.10
19	6.7	Progresiva	-18.8	2.05	0.99	0.10
18	6.8	Progresiva	-17.8	2.14	1.03	0.10
17	6.8	Progresiva	-16.8	2.23	1.08	0.10
16	6.9	Progresiva	-15.8	2.34	1.13	0.10
15	6.9	Progresiva	-14.8	2.46	1.19	0.10
14	7.0	Progresiva	-13.8	2.60	1.26	0.10
13	7.1	Progresiva	-12.8	2.75	1.33	0.10
12	7.2	Progresiva	-11.8	2.93	1.41	0.10
11	7.3	Progresiva	-10.8	3.13	1.51	0.10
10	7.4	Progresiva	-9.8	3.36	1.63	0.10
9	7.0	Rompiente	-8.8	3.40	1.64	0.10
8	6.2	Rompiente	-7.8	3.23	1.56	0.10
7	5.5	Rompiente	-6.8	3.05	1.47	0.10
6	4.7	Rompiente	-5.8	2.85	1.38	0.10
5	3.9	Rompiente	-4.8	2.62	1.27	0.10
4	3.1	Rompiente	-3.8	2.36	1.14	0.10
3	2.3	Rompiente	-2.8	2.06	1.00	0.10

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tabla 5.24. Cargas hidrodinámicas sobre la cañería

Profundidad	F.Arrastre	F.Inercia	F. Horizontal	F.Lift
d (m)	(tonf/m)	(tonf/m)	(tonf/m)	(tonf/m)
30	0.0037	0.0044	0.0081	0.00221
29	0.0039	0.0046	0.0084	0.00234
28	0.0041	0.0047	0.0088	0.00248
27	0.0044	0.0048	0.0092	0.00264
26	0.0047	0.0050	0.0096	0.00281
25	0.0050	0.0051	0.0101	0.00300
24	0.0053	0.0053	0.0106	0.00321
23	0.0057	0.0055	0.0112	0.00344
22	0.0061	0.0057	0.0118	0.00370
21	0.0066	0.0059	0.0125	0.00399
20	0.0071	0.0062	0.0132	0.00432
19	0.0077	0.0064	0.0141	0.00468
18	0.0083	0.0067	0.0150	0.00510
17	0.0091	0.0070	0.0161	0.00558
16	0.0100	0.0073	0.0174	0.00614
15	0.0111	0.0077	0.0188	0.00679
14	0.0123	0.0081	0.0204	0.00756
13	0.0138	0.0086	0.0224	0.00848
12	0.0156	0.0092	0.0247	0.00959
11	0.0178	0.0098	0.0276	0.01096
10	0.0205	0.0105	0.0311	0.01269
9	0.0524	0.0107	0.0524	0.01296
8	0.0474	0.0101	0.0474	0.01172
7	0.0423	0.0096	0.0423	0.01043
6	0.0369	0.0089	0.0369	0.00909
5	0.0313	0.0082	0.0313	0.00770
4	0.0255	0.0074	0.0255	0.00626
3	0.0195	0.0065	0.0195	0.00476

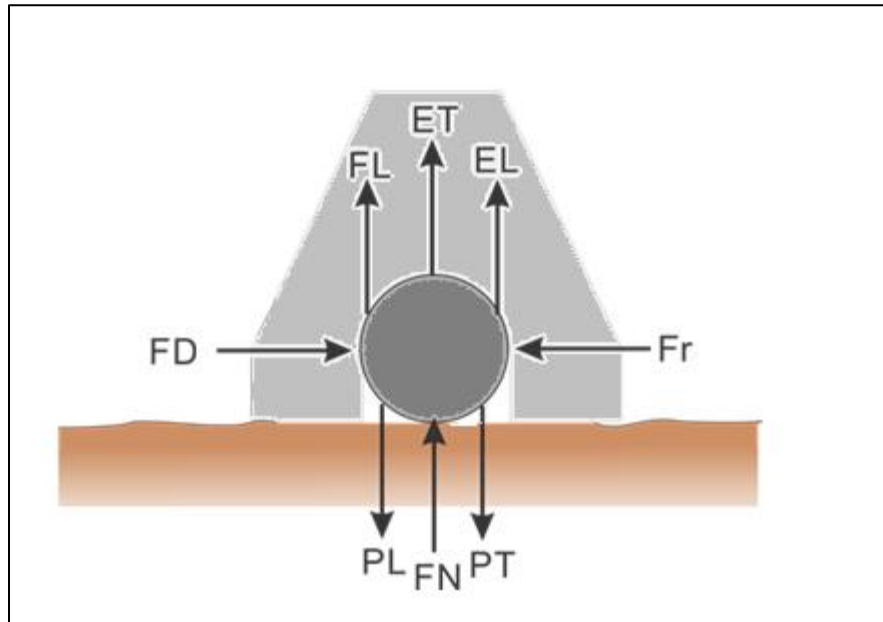
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se puede apreciar que entre los veriles 9 al 3 hay un aumento considerable de las fuerzas de arrastre. Esto se debe a que para la condición de rompiente aplicando el criterio de McCowan (1891), la ola para el caso de clima extremo del oleaje $H_s=7.31$ [m] rompe a la profundidad de 10 [m], por lo que el coeficiente de arrastre C_D aumentó a $C_{Dr}=2.75$, por lo que se consideró este coeficiente entre los veriles 10 al 3, mientras que $C_D=1.1$ entre los veriles 30 al 11 para el oleaje progresivo.

5.5.3.3 DISTANCIAMIENTO DE LOS MUERTOS DE FIJACIÓN

La Figura 5.34 muestra el diagrama de cuerpo libre de la cañería y muerto de fijación apoyado sobre el fondo marino.

Figura 5.34. Diagrama de cuerpo libre cañería-muerto de fijación



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Del equilibrio de fuerzas, tanto horizontales como verticales, la separación máxima (S_{max}) entre muertos se calcula con la siguiente fórmula:

$$S_{Max} = \frac{PL - EL}{FS \left(FL + \frac{FD}{\mu} \right) + ET - PT}$$

Dónde:

PL =Peso del muerto de fijación [tonf]

EL =Empuje del muerto de fijación [tonf]

FL = Fuerzas de levante en la cañería [tonf/m]

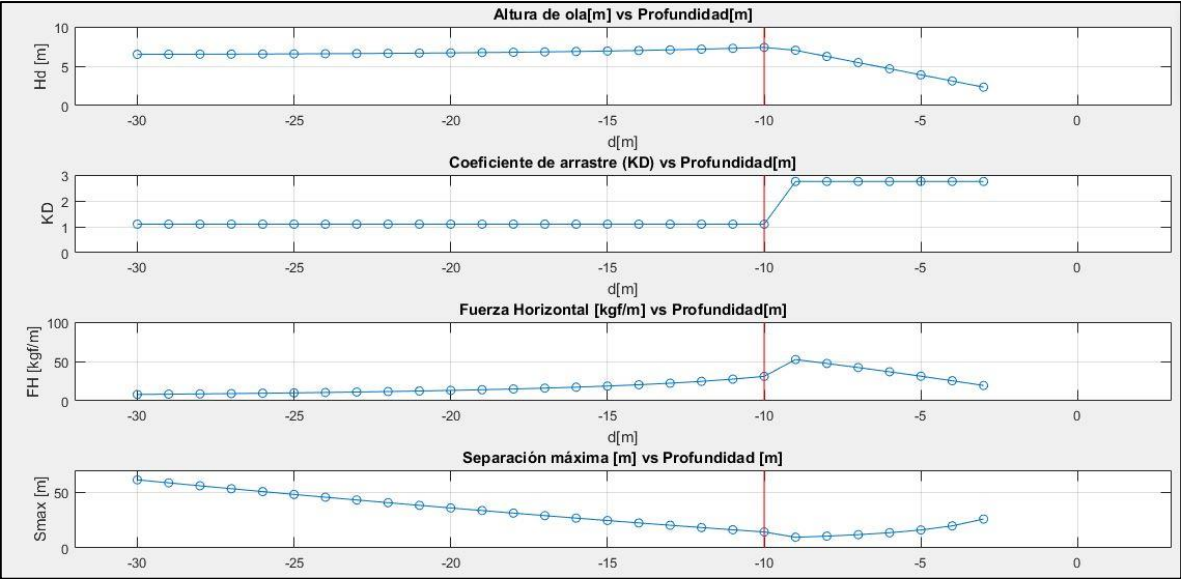
FD = Fuerzas horizontales en la cañería [tonf/m]

FS = Factor de seguridad considerado =1.2

μ = Coeficiente de roce = 0.75 (OCDI, 2002)

En la Figura 5.35 se presenta un resumen gráfico de los cálculos obtenidos. En todos los paneles, la línea vertical roja indica el veril en el cual rompe el oleaje de diseño considerado.

Figura 5.35. Resumen gráfico de los cálculos obtenidos



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En la Tabla 5.25 se presentan los resultados de la separación máxima (S_{max}) entre muertos de fijación [m] para cada veril de profundidad analizado.

Tabla 5.25. Separación máxima entre muertos de fijación

Profundidad	Smax
d (m)	(m)
30	61
29	59
28	56
27	53
26	51
25	48
24	46
23	43
22	41
21	38
20	36
19	34
18	31
17	29
16	27
15	25
14	23
13	20
12	18
11	16
10	14
9	10
8	11
7	12
6	14
5	16
4	20
3	26

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Entre los 9 y los 3 [m] de profundidad se encuentra la zona de rompientes, por lo que es necesario un menor distanciamiento entre muertos de fijación. Por resguardo se considerará un espaciamento de 10 [m] entre muertos entre los 9 y los 3 [m] de profundidad. Se estimó que entre los veriles 30 y 10 el espaciamento mínimo entre muertos debe ser de 14 [m], por lo que se considerará este distanciamiento entre muertos de fijación por resguardo.

5.5.3.4 DEFINICIÓN MUERTOS DE TÉRMINO

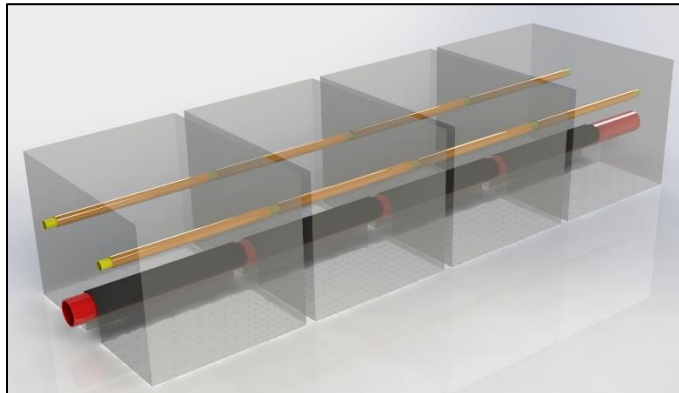
El extremo de cada cañería contará con muertos de término tipo montura, es decir, colocados una vez que la cañería es emplazada en el fondo marino. Estos muertos están destinados a otorgar un punto de apoyo y fuerza que resista el esfuerzo sobre las cañerías submarinas que ejercerán los flexibles y la nave. Por lo mismo, ante un zarpe de emergencia dicho muerto permitirá que la válvula break away instalada en la línea de flexibles se corte a la tracción, sin que ello signifique que las cañerías submarinas se vean afectadas en su integridad.

La función de la válvula break away, es impedir un derrame de proporciones en el mar, que puede ocurrir en un sistema de descarga o carga de hidrocarburos, si por cualquier causa se somete a la parte submarina a soportar un gran esfuerzo, como podría ser el producido porque el buque tanque se larga sin desconectar los flexibles.

Para permitir la correcta operación de la válvula break away en la línea de flexibles, se proyecta un sistema de tren de muertos de muertos tipo paralelepípedo, de forma tal que queden unidos entre sí. Esto se logra mediante dos cañerías de acero dispuestas de forma tal de generar una conexión rígida entre los muertos, además de servir como apoyo al levantamiento y colocación del tren de muertos sobre las cañerías submarinas.

La Figura 5.36 muestra un esquema del sistema de tren de muertos de término.

Figura 5.36. Esquema sistema de elementos de término

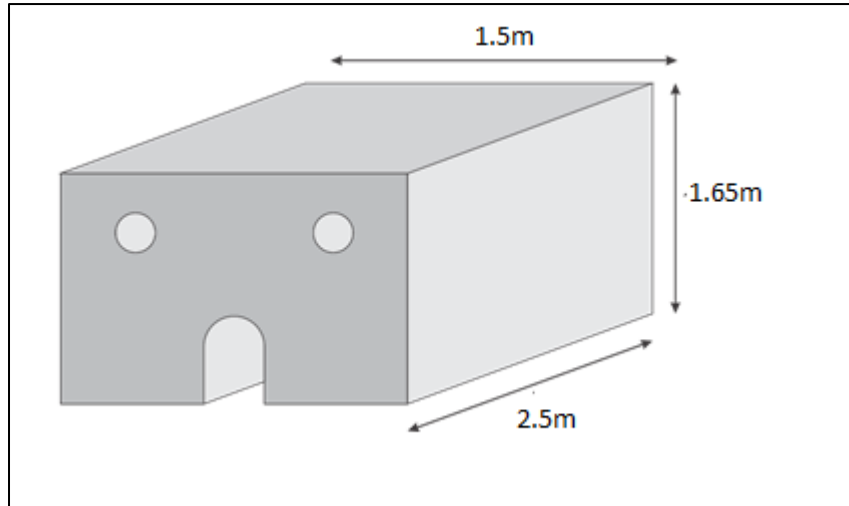


FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Cada muerto tiene dimensiones 2.5 x 1.5 [m] de base y 1.65 [m] de altura de base, lo que resulta en una masa total de aproximadamente 14.08 [tonf], considerando las perforaciones para las cañerías de unión y la perforación tipo montura para la cañería de combustible. Así, el sistema de muertos tiene una masa total de 56.32 [tonf], lo que sumergido en agua de mar pesa 33.95 [tonf].

La Figura 5.37 muestra un esquema del muerto de término unitario, con sus dimensiones.

Figura 5.37. Muerto de término unitario



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

A continuación se muestra el procedimiento del dimensionamiento de muertos de término.

Parámetros de entrada

Peso esp. agua de mar:

$$\rho_a := 1.0254 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Peso esp. hormigón:

$$\rho_h := 2.45 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Peso esp. acero:

$$\rho_{ac} := 7.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Recubrimiento:

$$\text{Rec} := 6\text{mm}$$

Diámetro externo tubería:

$$\phi := 14\text{in}$$

Tensión de rotura break awc $\phi 12''$

$$T_R := 217\text{kN}$$

Hoja de datos Anexo F

Coefficiente de roce:

$$\mu := 2$$

Coef. Rosc PLEM semi enterrado

Ángulo línea de flexibles horizontal

$$\theta := \text{asin}\left(\frac{41}{80}\right) = 30.83 \cdot \text{deg}$$

Profundidad 30 m
Franco bordo 11m
Largo flexibles 80m

Factor de seguridad:

$$\text{FS} := 1.1$$

Dimensiones del muerto

Diámetro con recubrimiento $d_m := \phi + 2 \cdot \text{Rec} + 5\text{cm} = 41.76 \cdot \text{cm}$

Diámetro tubos acero $d_t := 6\text{in}$

Alto superior $a_m := 1.65\text{m}$

Alto inferior $h_m := 45\text{cm}$

Ancho $c_m := 1.5\text{m}$

Espesor paredes $e_m := 2.5\text{m}$

Características del muerto

Volumen muerto: $V_m := (a_m \cdot c_m \cdot e_m) - (h_m \cdot d_m \cdot e_m) - \left(\pi \cdot \frac{d_m^2}{8} \cdot e_m \right) - \pi \cdot \frac{(d_t)^2}{2} \cdot e_m = 5.46 \text{ m}^3$

Peso seco muerto: $P_m := V_m \cdot \rho_h + \pi \cdot \frac{d_t^2}{2} \cdot e_m \cdot \rho_{ac} = 14.08 \cdot \text{tonf}$

Peso sumergido: $P_{ms} := P_m - V_m \cdot \rho_a = 8.49 \cdot \text{tonf}$

Número de muertos: $N_m := 4$

Peso total muertos sumergidos: $W_m := P_{ms} \cdot N_m = 33.95 \cdot \text{tonf}$

A continuación se muestra el procedimiento de cálculo tanto del dimensionamiento de los muertos de término como verificación de la resistencia del sistema de muertos de término considerando la deriva del buque en las tres direcciones principales: E-W; S-N; W-E.

Tipos de fallo PLEM

Giro por levante $FS1 := \frac{W_m}{2 \cdot FS \cdot T_R \cdot \sin(\theta)} = 1.361$

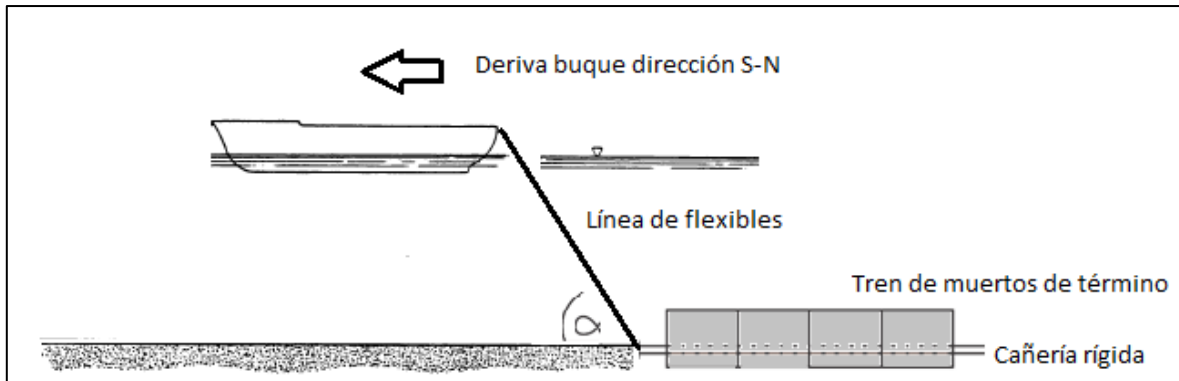
Levante $FS2 := \frac{W_m}{FS \cdot T_R \cdot \sin(\theta)} = 2.722$

Giro por deslizamiento $FS3 := \frac{(W_m - FS \cdot T_R \cdot \sin(\theta)) \cdot \mu}{2 \cdot FS \cdot T_R \cdot \cos(\theta)} = 1.027$

Deslizamiento $FS4 := \frac{(W_m - FS \cdot T_R \cdot \sin(\theta)) \cdot \mu}{FS \cdot T_R \cos(\theta)} = 2.055$

La Figura 5.38 muestra un esquema un ejemplo de aplicación de fuerza en caso de deriva del buque en dirección S-N.

Figura 5.38. Aplicación de fuerza en caso deriva Buque dirección S-N



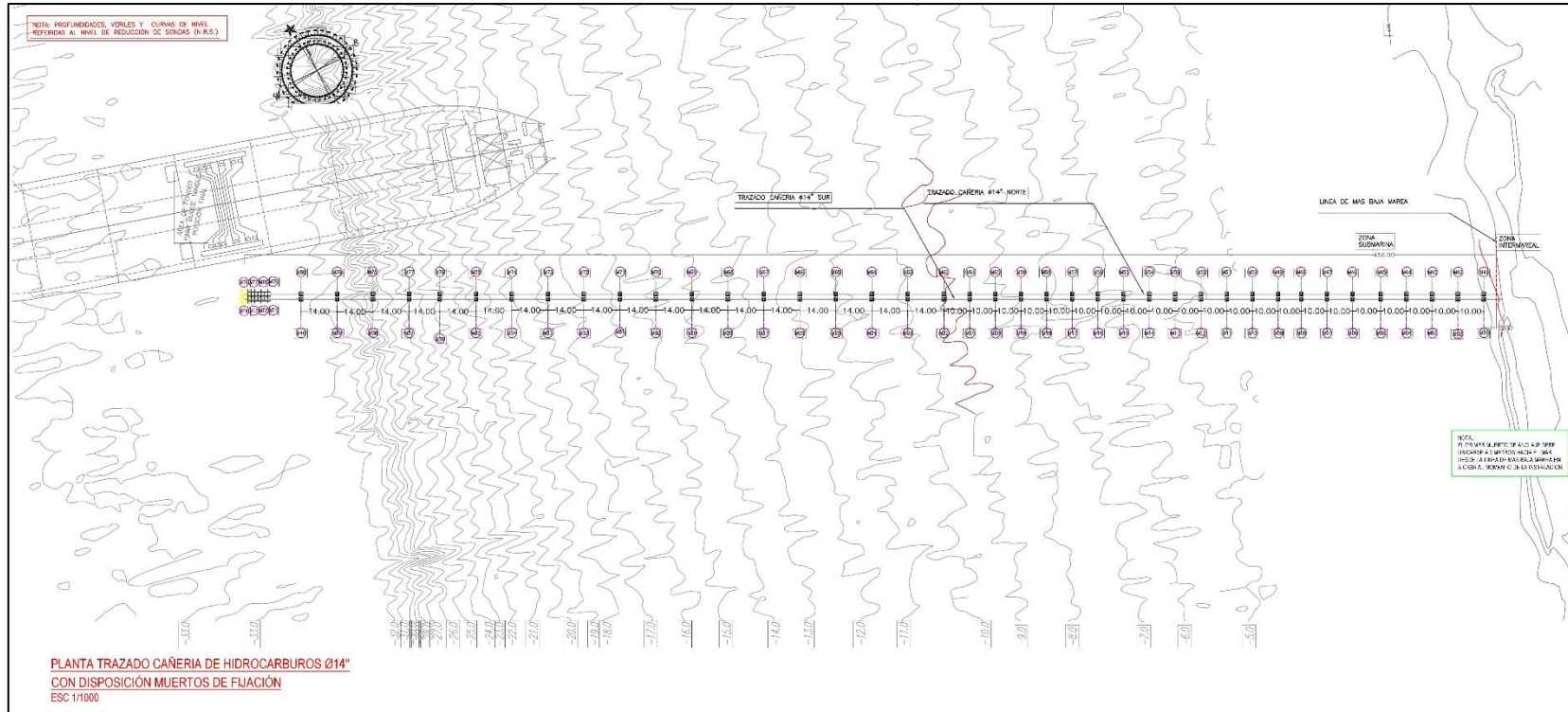
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Los cálculos precedentes indican que en cualquier dirección de deriva del buque con los flexibles sin desconectar, el Factor de Seguridad resulta mayor 1. Así, el sistema de muertos de término es adecuado para la correcta operación de la válvula Break Away.

5.5.3.5 PLANTA Y PERFIL DE CAÑERÍAS SUBMARINAS CON DISPOSICIÓN DE MUERTOS DE FIJACIÓN

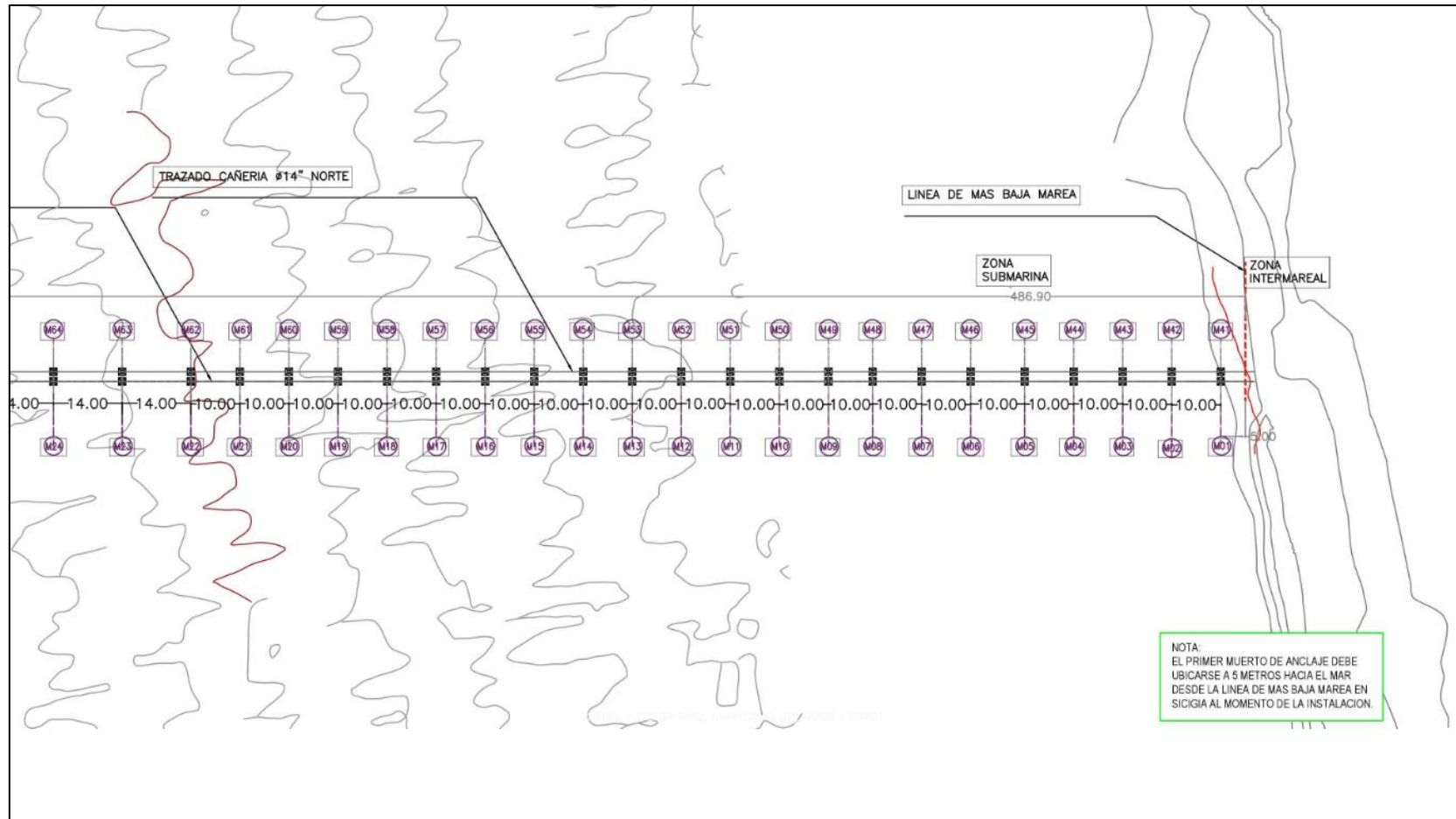
La Figura 5.39, Figura 5.40 y la Figura 5.41 muestran el trazado en planta de las cañerías submarinas con disposición de muertos de fijación. La Figura 5.42, Figura 5.43 y la Figura 5.44 muestran el alzado longitudinal de cañería con disposición de muertos de fijación. Tanto la cañería norte como la cañería sur disponen de un total de 40 muertos de fijación tipo tronco piramidal con un peso seco aproximado de 1.7 [tonf] contabilizados desde la zona intermareal a 5 [m] de la línea de más baja marea, hasta una distancia de 12.36 [m] del muerto de término número uno. Además cada cañería dispone 4 muertos de término tipo paralelepípedo con un peso seco aproximado de 14.08 [tonf], los cuales van unidos para permitir una conexión rígida.

Figura 5.39. Planta trazado cañerías de petróleo con disposición de muertos de fijación



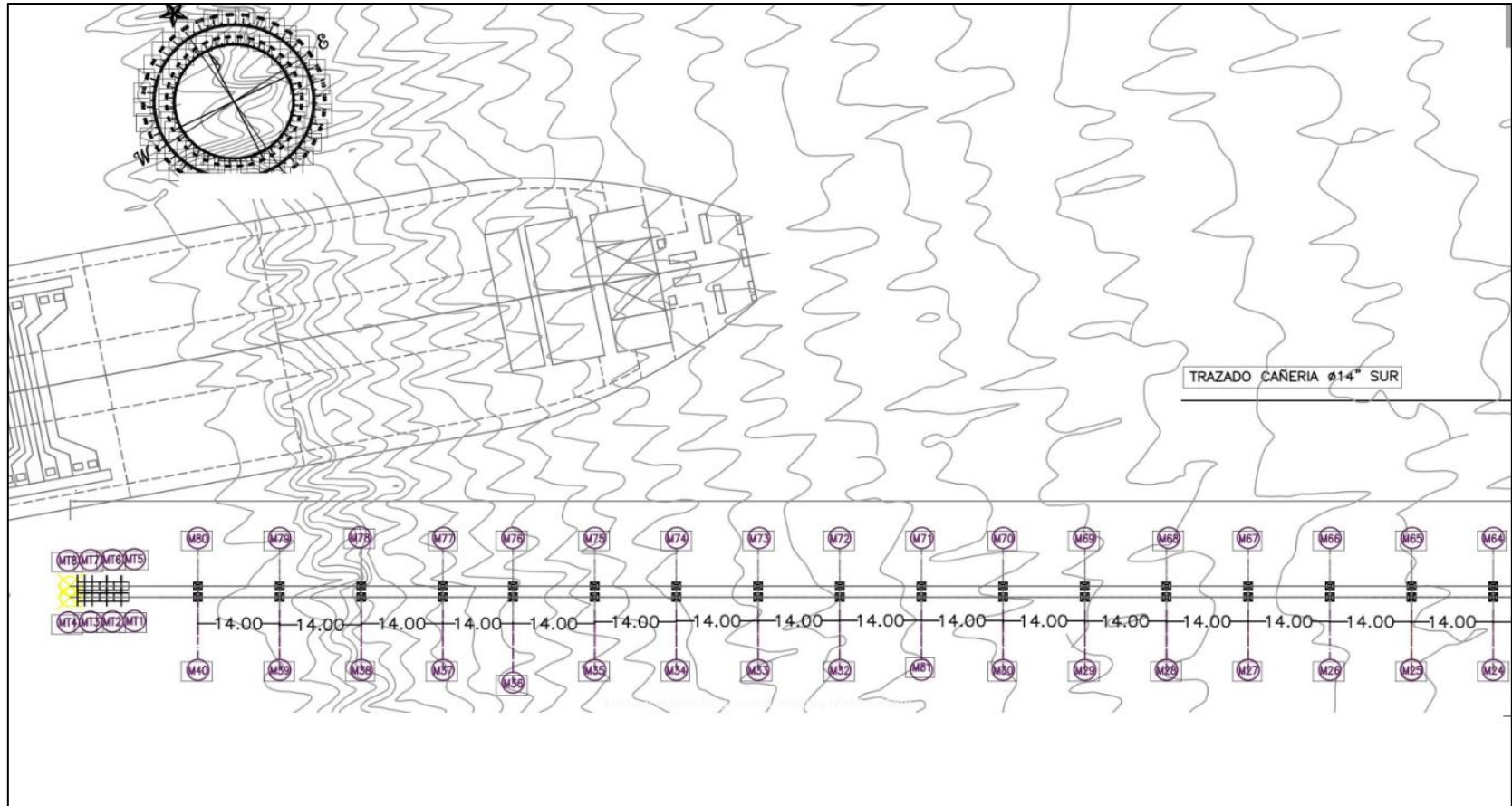
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.40. Planta trazado inicial cañerías de petróleo con disposición de muertos de fijación



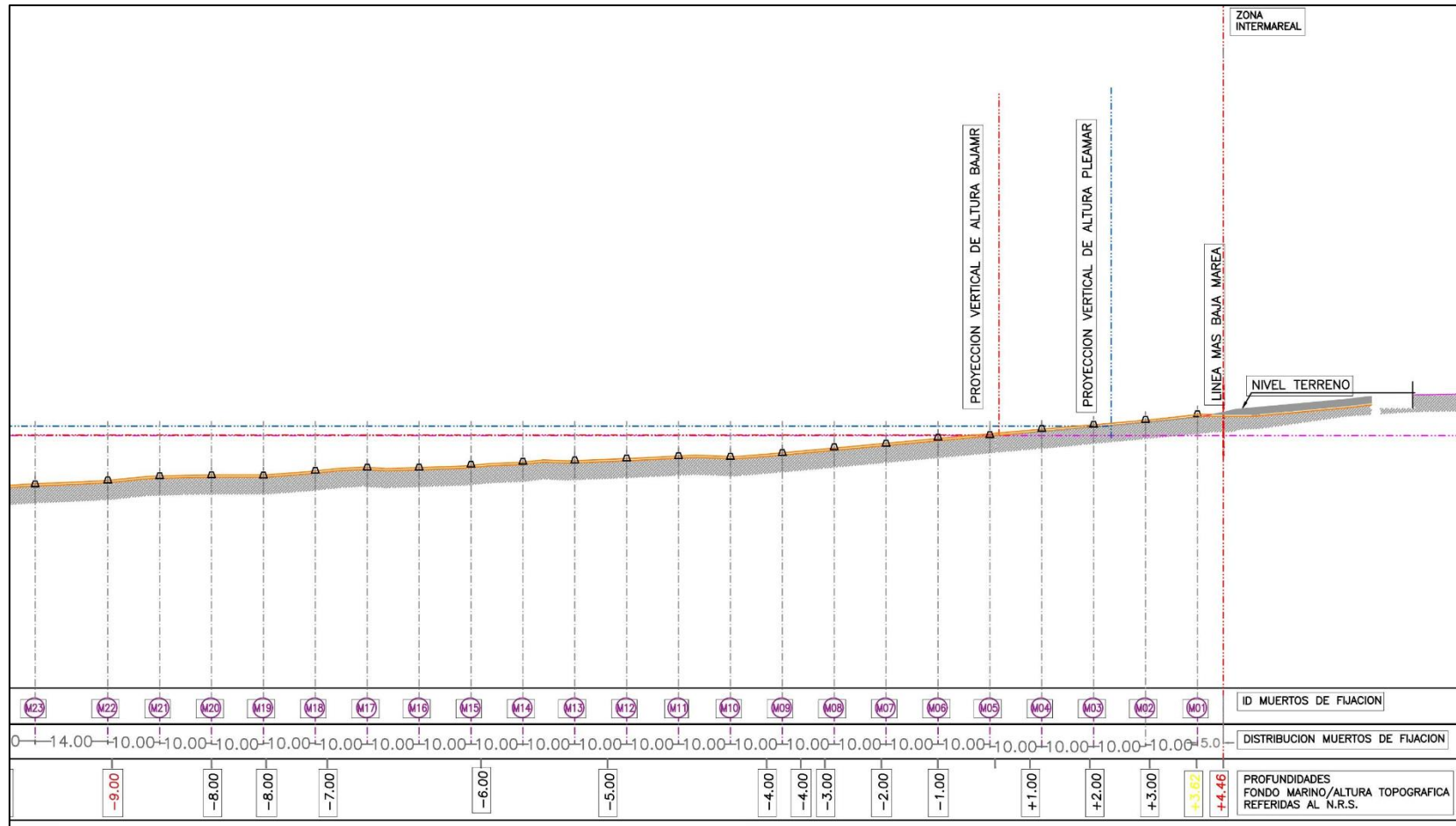
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.41. Planta trazado final cañerías de petróleo con disposición de muertos de fijación



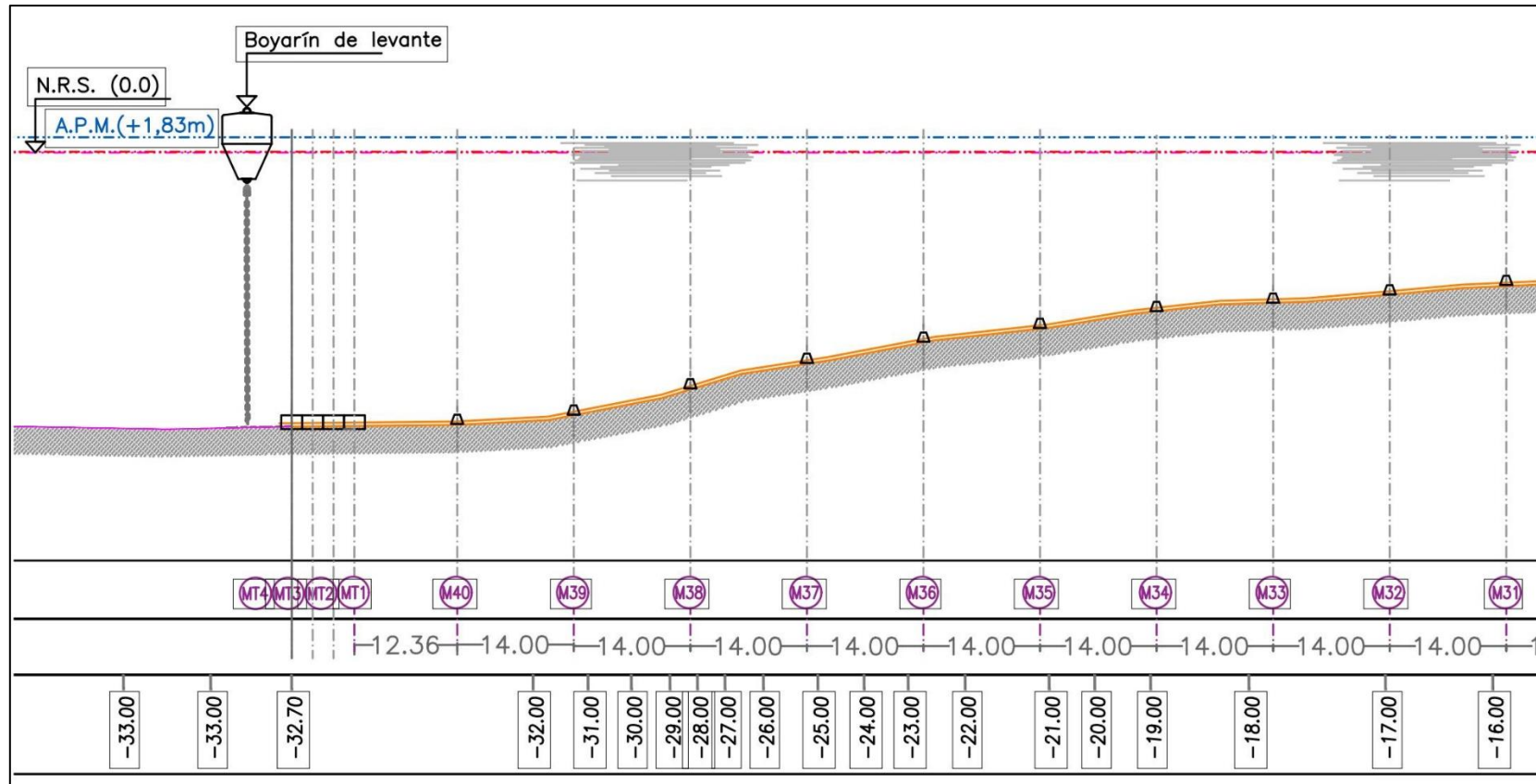
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.43. Alzado longitudinal parte inicial de cañerías con disposición de muertos de fijación



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura 5.44. Alzado longitudinal parte final de cañerías con disposición de muertos de fijación



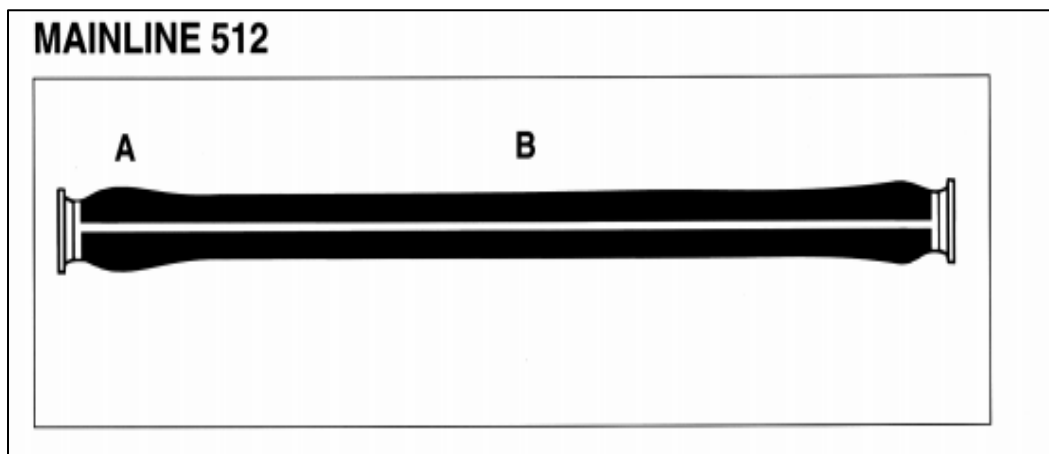
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.6 CAÑERÍAS FLEXIBLES

Los flexibles utilizados en el terminal marítimo serán del tipo SUBMARINE MAINLINE STANDARD OCIMF 1991 512 marca Dunlop de 12 [pulg] de diámetro. Estos flexibles son conectados a las cañerías rígidas al fondo del mar, y son levantados mediante el boyarín de levante y acoplados al manifold del buque tanque cuando este requiera realizar descarga de petróleo.

La Figura 5.45 muestra un esquema del flexible seleccionado y la Tabla 5.26 sus características.

Figura 5.45. Flexible Mainline 512



FUENTE: OFFSHORE HOSE MANUAL 1991

Tabla 5.26. Características cañería flexible Mainline 512

Hose Bore (in/mm)		Approx. Dimensions (mm)		Weight in air empty (kg)		Weight in air full of sea water (kg)		Underwater weight full of sea water (kg)	
Nominal	Actual	A	B	9.1m	10.7m	9.1m	10.7m	9.1m	10.7m
6in 150mm	6in 152mm	302	211	342	383	512	583	141	154
8in 200mm	8in 203mm	362	269	488	548	790	904	203	224
10in 250mm	10in 254mm	417	326	684	769	1157	1325	313	344
12in 300mm	12in 305mm	472	380	830	932	1511	1732	377	413
16in 400mm	15.25in 387mm	559	468	1183	1327	2282	2619	587	643
20in 500mm	19.25in 489mm	677	579	1796	2013	3547	4072	973	1066
24in 600mm	23.25in 591mm	807	690	2478	2771	5033	5775	1376	1505

FUENTE: OFFSHORE HOSE MANUAL 1991

5.6.1 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE FLEXIBLES

A continuación, se presenta el procedimiento para determinar el número de flexibles a utilizar para el terminal marítimo, tanto para la cañería norte como la cañería sur.

Puntal	$P := 18\text{m}$	General arrangement nave Valdivia
Calado mínimo:	$D := 7\text{m}$	General arrangement nave Valdivia
Largo unitario flexibles:	$l_u := 10.7\text{m}$	Offshore hose manual
Distancia casco al manifold:	$D_m := 4\text{m}$	General arrangement nave Valdivia
Altura manifold por encima de la quilla:	$H_m := 19.8\text{m}$	General arrangement nave Valdivia
Distancia entre PLEM y casco del buque:	$L_1 := 10\text{m}$	OCIMF (2010)
Profundidad máxima:	$D_{\max} := 28\text{m}$	Profundidad fondeo a la altura del manifold + marea máxima
Franco bordo máximo:	$F_{\max} := P - D = 11\text{m}$	
Altura manifold del buque:	$M_h := H_m - P = 1.8\text{m}$	
Desplazamiento longitudinal buque:	$FA_{\max} := 5\text{m}$	PIANC(1995)
Desplazamiento transversal buque:	$SW_{\max} := 5\text{m}$	PIANC(1995)
Factor de seguridad:	$FS := 1.3$	

$$T_L := \left[L_1 + D_{\max} + F_{\max} + M_h + D_m + \sqrt{(FA_{\max})^2 + (SW_{\max})^2} \right] \cdot FS = 80.4\text{ m}$$

Número de flexibles a ocupar:

$$N_f := \text{ceil}\left(\frac{T_L}{l_u}\right) = 8$$

En base a la metodología de OCIMF (2010) se determinó que cada cañería submarina tendrá un total de 8 flexibles de 10.7 [m] cada una.

5.7 DEFINICIÓN DEL BOYARÍN DE LEVANTE

Se consideraron los siguientes estados de carga, representados esquemáticamente en la Figura 5.46.

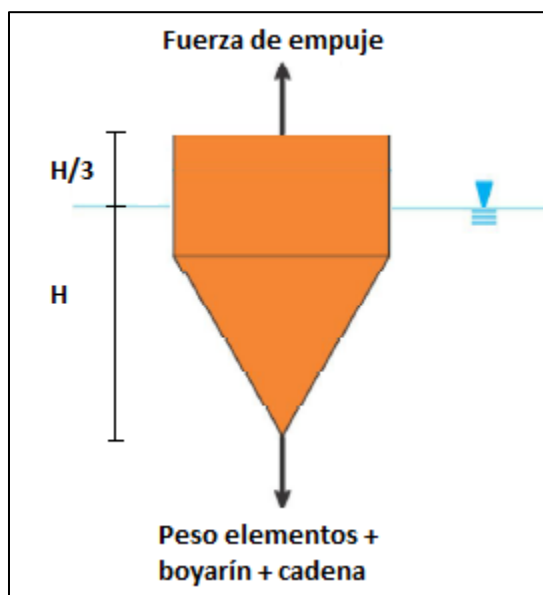
- **Peso propio:** Se consideraron las solicitaciones permanentes de los elementos asociados a la cadena de levante que intentan hundir el boyarín.
- **Fuerza hidrostática:** Se consideró la acción ejercida por el agua de mar sobre el boyarín.

Se supuso que la porción superior del boyarín no debe hundirse más de 1/3 de su altura de acuerdo a OCDI (2012). De esta forma el boyarín será visible al momento de recoger por los operadores, como se aprecia en la Figura 5.46.

Como criterio conservador, no se consideró la disminución del peso propio de los elementos sumergidos asociados a la cadena.

En el ANEXO H se presenta la ficha técnica del boyarín de levante a utilizar para cada cañería.

Figura 5.46. Estados de carga sobre el boyarín de levante



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En la Tabla 5.27 se presenta los pesos de los elementos asociados al boyarín y cadena de levante.

Tabla 5.27. Pesos de los elementos asociados al boyarín y cadena de levante.

LISTADO GENERAL ELEMENTOS, BOYARIN DE LEVANTE LINEA Ø14" NORTE				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PESO UNITARIO (kgf)	PESO TOTAL(kgf)
Boyarín de levante, 1.500 lt	un	1	87	87
Grillete D Ø3/4" (D Shackle); Grado 2	un	4	0.8	3.2
Detorcedor Ø3/4" (Giratorio); Grado 2	un	1	0.8	0.8
1 Paño cadena Ø3/4" con mallete y eslabones de término alargados; Grado 2	ml	27.5	9	247.5
Tramo cadena Ø3/4" con mallete Grado 2	ml	11.5	9	103.5
			TOTAL	442
LISTADO GENERAL ELEMENTOS, BOYARIN DE LEVANTE LINEA Ø14" SUR				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PESO UNITARIO (kgf)	PESO TOTAL(kgf)
Boyarín de levante, 1.500 lt	un	1	87	87
Grillete D Ø3/4" (D Shackle); Grado 2	un	4	0.8	3.2
Detorcedor Ø3/4" (Giratorio); Grado 2	un	1	0.8	0.8
1 Paño cadena Ø3/4" con mallete y eslabones de término alargados; Grado 2	ml	27.5	9	247.5
Tramo cadena Ø3/4" con mallete Grado 2	ml	11.5	9	103.5
			TOTAL	442

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE CATÁLOGO DE PRODUCTOS HINRICHSEN Y SONS PROVEEDORES MARÍTIMOS

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo para verificar la flotabilidad del boyarín de levante.

Flotabilidad boyarín de levante

Densidad agua de mar: $\rho_{am} := 1025 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$

Altura del boyarín: $h_b := 1664\text{mm}$

Volumen total boyarín: $V_{tb} := 1500\text{L}$

Volumen porción de boyarín que se mantiene sobre el nivel del mar: $V_{pb} := \frac{h_b}{3} \cdot \left(\frac{1350\text{mm}}{2}\right)^2 \cdot \pi = 793.943 \cdot \text{L}$

Volumen efectivo boyarín: $V_{eb} := V_{tb} - V_{pb} = 706.057 \cdot \text{L}$

Peso boyarín: $P_b := 87\text{kgf}$

Pesos asociados a la cadena: $P_a := 442\text{kgf}$

Sumatoria de fuerzas verticales que hundan la cañería: $P_{hundimiento} := P_b + P_a = 529 \cdot \text{kgf}$

Fuerzas que levantan al boyarín: $P_{levante} := V_{eb} \cdot \rho_{am} = 0.798 \cdot \text{tonf}$

Factor de seguridad: $FS := \frac{P_{levante}}{P_{hundimiento}} = 1.4$

Verificación := $\begin{cases} \text{"Cumple, las dimensiones del boyarín son suficientes"} & \text{if } FS > 1.25 \\ \text{"No cumple, aumentar las dimensiones del boyarín"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Verificación = "Cumple, las dimensiones del boyarín son suficientes"

6 DISCUSIONES Y OBRAS COMPLEMENTARIAS

6.1 OBRAS COMPLEMENTARIAS

A continuación se comentan todas las obras que son importantes de considerar en un proyecto real relacionado al diseño integral de un terminal marítimo.

6.1.1 ZONA DE PLAYA Y TERRENO DE PLAYA

Para el caso de las obras comprendidas en la zona de playa y terrenos de playa, se enterrará la cañería a una cota de 60 [cm], medidos de la clave superior de la cañería, en todo el recorrido de la zona de playa y el terreno de playa. Este sistema evita el deterioro de la cañería en condición de trabajo.

6.1.2 CASETA DE VÁLVULA

La caseta de válvula es una estructura materializada en hormigón armado, que permite la llegada de las cañerías conductoras desde la zona de playa.

Dicha caseta, estaría implementada con válvulas de corte en cada cañería, manómetros y otros elementos de control.

La caseta en sí es una forma de poner un elemento de seguridad ante derrame de productos por alguno de los flanges o elementos de medición, quedando “confinado” cualquier derrame en caso de ocurrir.

6.1.3 SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN MARÍTIMA

Para maniobras de aproximación e ingreso de las naves al terminal marítimo, se debería proyectar una enfilación de entrada conformada por balizas de señales marítimas, las que para su diseño deben cumplir con la normativa IALA.

Las balizas de señalización, son estructuras conformadas por torres metálicas, las cuales tienen una altura estimada según las variables de topografía de la zona de emplazamiento de las mismas. Estas están dotadas por un panel óptico, que cumpla con visión de 3 millas náuticas, con 2 franjas laterales color rojo y una franja central color blanco, que cumplan con IALA.

6.1.4 SISTEMA DE ADUCCIÓN DE AGUA DE MAR

Para combatir los incendios en la planta del terminal marítimo se debería proyectar un sistema de aducción de agua de mar. Este sistema considera la aspiración e impulsión de agua, desde el mar hasta una piscina de acumulación terrestre. La aspiración e impulsión se realiza mediante una bomba y una cañería de HDPE.

6.2 DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se enuncian una serie de discusiones y recomendaciones según los objetivos planteados en el presente proyecto:

Respecto al análisis estático para obtener las cargas sobre los elementos de apoyo del buque tanque, cabe destacar que estas fueron calculadas mediante el modelo SAP2000 modelado la nave como una barra infinitamente rígida, la cual es amarrada mediante cables de polipropileno a apoyos deslizantes para obtener las tensiones de carga que reciben las boyas a popa y anclajes propios a proa. Para sacar dichas cargas, fueron ingresadas al modelo todas las cargas oceanográficas calculadas sobre el buque mediante la metodología propuesta por la ROM 3.1-99 (2000) (ver ANEXO D) mediante una envolvente de 48 combinaciones de carga, donde el modelo selecciona el caso más desfavorable para cada elemento de apoyo. El análisis se realizó tanto para el eje longitudinal (eje x) y en sentido transversal (eje y).

Las cargas oceanográficas fueron ingresadas al modelo en el centro de la barra infinitamente rígida. Sin embargo, el centro de gravedad del buque de diseño se encuentra más cargado a la zona donde se encuentra el castillo del buque. Por lo cual se pierde precisión a la hora de efectuar dichos cálculos. Es por esto que para las cargas de los elementos de apoyo se efectuaron factores de seguridad, según las recomendaciones de OCIMF (2010) con un FS=1.5.

Es recomendable siempre que se tengan los recursos computacionales, realizar un análisis dinámico de cargas sobre el buque tanque, para así obtener una mayor precisión de los cálculos tanto en la obra viva (olas y corrientes) como en la obra muerta del buque (vientos).

Respecto a los muertos de fijación tanto para las cañerías de transferencia como los anclajes de peso muerto para las pernadas de trabajo, es necesario realizar en ingeniería de detalles una cubicación de las barras de acero las cuales limitan las grietas del hormigón. Además cada muerto debe estar dotado de cáncamos de acero, para que puedan ser manipulados mediante grúas e instalados en los sitios correspondientes indicados en los planos.

Los muertos de fijación tienen además una capacidad de succión en el fondo marino, la cual aumenta considerablemente su capacidad de agarre. Esto no fue considerado en los cálculos, lo que aumenta aún más su factor de seguridad implícitamente.

Respecto de la entrada del buque tanque al fondeadero, es necesario en un proyecto incluir un estudio de balizas de señalización en tierra que den apoyo a las maniobras de entrada y fondeo de las naves que recalarán en el terminal.

Las balizas de señalización indican los puntos específicos en los cuales el buque debe largar sus anclas a proa, además de ayudar en la ruta que el práctico del buque debe tomar para fondear correctamente.

Una vez que el buque se encuentra a cierta distancia del fondeadero, este debe ser apoyado mediante remolcadores para realizar la maniobra correspondiente, y la proa del buque quede apuntando en dirección WNW. Es importante contar con un asesor náutico,

el cual da las directrices para realizar un plan de maniobra de forma tal que el buque sea fondeado correctamente.

Respecto a los caudales y presión que lanza el buque mediante los manifold de descarga, es necesario que no se sobrepase un límite admisible por normativa del Decreto 160 (2009), el cual hace referencia que las velocidades en toda la cañería no deben sobrepasar los 7 [m/s]. Además de esto, hay que considerar un factor de seguridad 5 para la rotura de los flexibles. De esta forma se obtiene una mayor precaución para realizar la descarga de productos sin poner en riesgo a que se produzca un derrame de petróleo de proporciones en el océano.

El proyecto terrestre debe ser correctamente conectado al proyecto marítimo, Este debe contar con una granja de tanques de almacenamiento de productos, livianos y pesados. Se debería realizar un cálculo hidráulico para verificar a que presión llegan los productos a los tanques de almacenamiento, teniendo en consideración si las cañerías terrestres realizan algún tipo de reducción o aumento en su diámetro, al igual que contabilizar todos sus elementos tanto bombas como válvulas.

7 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones son enumeradas continuación según el orden de desarrollo del trabajo y de la presentación de los resultados:

i. Respecto al análisis de condiciones naturales

El clima medio de oleaje en el sitio de interés, se caracterizó por ser en mayor porcentaje proveniente de las direcciones WNW con un 81.03 % y del NW con 11.24%, con alturas de olas concentradas entre 0 a 0.5 [m] con un porcentaje de ocurrencia de 68.16% y rangos de altura entre 0.5 a 1.0 [m] con un 16.36%. Con respecto al periodos peak en los intervalos de 13 a 15 [s], se observó una frecuencia del 44.42 %, y en rangos de periodos entre 11 a 13 [s], con una frecuencia del 35.8 %.

Con respecto al análisis de clima extremo en el sitio de interés, se definió una altura de ola con un umbral de 4.5 [m] mediante el método POT, donde se identificaron 29 tormentas. La mejor distribución a utilizar resultó ser la distribución Weibull $k=1$, con un 94.09 % de coeficiente de determinación, con la cual se obtuvo una altura de ola de 7.31 [m] con un período de retorno de 100 años.

Del estudio estadístico de vientos obtenido mediante el modelo numérico WRF perteneciente FCMC (2012), se observó que el mayor porcentaje de direcciones de vientos proviene de las direcciones S, SW, SSW con un 52.23% del total de la estadística, y vientos entre 1 a 10 Nudos con un 90.72 %.

Referente a las corrientes según el estudio realizado por la firma Geomar el año 2003 los resultados indican un predominio de las direcciones asociadas al 1er y 2do cuadrante hacia el Este, con magnitudes entre 1 y 7 [cm/s] en el correntómetro superficial y entre 1 y 5 [cm/s] para el correntómetro profundo. En las mayores velocidades predominan las direcciones Este, Noreste y Weste con magnitudes sobre 15 [cm/s] en la superficie.

ii. Respecto al downtime operacional

Para el downtime operacional por oleaje se definió un humbral de operación alturas de ola de hasta 1.5 [m] según OCIMF (2010), donde se recomienda operaciones de atraque y desconexión restringidas por este límite de oleaje para terminales multiboya.

El downtime operacional por oleaje sería de 10%, lo cual sería un porcentaje aceptable por lo que conlleva los altos costos de inoperancia según Thorensen (2003).

Respecto al downtime operacional por viento, se utilizó la recomendación de ROM (2000) para operación de terminales multiboya donde se una velocidad absoluta del viento de 10 [m/s] (20 Nudos). Sin embargo, por efectos de seguridad del terminal marítimo, se consideró una velocidad de operación por viento de 7.5 [m/s] (15 Nudos). Con este umbral de operación se obtuvo un downtime operacional por viento menor al 1%, lo que se considera un tiempo inoperativo por viento bajo, lo cual indica que sólo se debe tener precaución en casos de que haya rachas de sobre los 20 Nudos.

En el downtime operacional por corriente se definió una velocidad límite de 0.5 [m/s] según ROM (2012). Sin embargo, por efectos de seguridad del terminal marítimo, se determinó una velocidad de operación de 0.26 [m/s] o 0.5 [nudos]. Con esto se obtuvo un downtime operacional de 1.32%, el cual se considera un porcentaje de tiempo de inoperatividad bajo y aceptable para realizar operaciones de carga y descarga de productos.

iii. Respecto al layout del proyecto

Se definió un sistema de amarre convencional (CBM) con 3 boyas de amarre a popa y 2 anclas a proa mediante una matriz de selección de alternativas por el método AHP, la cual resultó ser la más económica y factible en términos de construcción.

Tomando en consideración que el downtime operacional de oleaje (10%) es mucho mayor al downtime operacional por vientos (1%) y corrientes (1%), el buque se orientó con la proa apuntando a la dirección predominante de oleaje del WNW (292.5°). De esta manera el buque ofrece una menor área al embate del oleaje, enfrentando la ola de incidencia.

Se definió que el buque tanque se emplazaría a una profundidad cercana a los 30 [m] (profundidad a la cual se ubicaría el manifold del buque a la mitad de su eslora) respecto al NRS, para que la nave tenga una mayor libertad para realizar movimientos transversales y longitudinales para maniobrar. La profundidad mínima requerida del buque tanque según el UKC calculado es de 16.5 [m] NRS, profundidad máxima a la cual el buque debe ubicar la popa.

El rumbo de las cañerías rígidas se definió a partir del promedio direccional del análisis de clima extremo del oleaje (dirección 312° respecto al norte), para que el ángulo en que el oleaje golpea la cañería se vea reducido en casos de temporal.

iv. Respecto al sistema de fondeo de la nave

El fondeo y amarre de los elementos debe resistir al menos lo que se indica a continuación: Boya aleta estribor al menos 32.4 [tonf], Boya popa al menos 4.9 [tonf] y Boya aleta babor al menos 34.3 [tonf]. Para resistir tales cargas, se realizó un diseño con muertos de fijación tipo "Wedge" verificando que cada pernada de trabajo resiste a las cargas de diseño con un factor de seguridad FS=1.5, según recomendación OCIMF (2010).

Con respecto a los resultados presentados en el cálculo de fondeo por amura o anclajes propios del buque a proa, estos deben resistir al menos de 42.3 [tonf] y 43 [tonf], por la banda de estribor y babor respectivamente.

Conforme a los datos obtenidos del General Arrangement del buque tanque, este tiene 2 anclas tipo Standard Stockless Halls de 11 [tonf] con cadenas de anclaje de 13 paños o 325 [m]. Se verificó mediante el procedimiento según NAVFAC (2012) que el anclaje a babor resiste 75.56 [tonf] y el anclaje a estribor resiste 75.59 [tonf]. Se confirmó que las anclas deben ser fondeadas con 6 paños de cadena.

A partir de todos los cálculos obtenidos en el ANEXO E, se puede apreciar que para todas las boyas a popa y anclajes a proa se forma un ángulo menor a 2° entre cadena/muerto y cadena/ancla, por lo cual se verifica que los anclajes funcionan con máxima eficiencia.

Los resultados del presente estudio indican que el fondeo y amarre a las boyas proporcionan un comportamiento seguro de la nave ante las condiciones de viento, corrientes y olas consideradas. Cabe mencionar que todos los resultados anteriormente descritos fueron de acuerdo con las condiciones oceanográficas definidas de corriente 0.5 Nudos, olas de $H_s=1.5$ [m], $T_p=13$ [s] y dirección $22^\circ.5$ respecto a la línea de crujía del buque. Para los vientos se consideró como criterio conservador rachas de vientos de 30 nudos (15.44 [m/s]).

v. Respecto al sistema de transferencia de carga

Se definió para el presente proyecto dos cañerías rígidas de acero para transferencia de productos, una para productos livianos y la otra para productos pesados del tipo Schedule 40 según la normativa de Decreto 160 (2009), las cuales se denominaron cañería norte y cañería sur. Ambas cañerías tienen un largo aproximado de 487 [m] de longitud y un diámetro de $\Phi 14''$, las cuales son protegidas con protección pasiva mediante una capa de fibra de vidrio anticorrosiva de 6 [mm] de espesor.

Respecto a la línea de flexibles, se definió para cada línea de cañerías un flexible de tipo SUBMARINE MAINLINE STANDARD OCIMF 1991 512 marca Dunlop de $\Phi 12''$ de diámetro. Cada uno poseerá una válvula break away, cuya función es impedir un derrame de proporciones en el mar. Esto puede ocurrir en un sistema de descarga o carga de hidrocarburos, si por cualquier causa se somete a la parte submarina a soportar un gran esfuerzo, como podría ser el producido porque el buque tanque se larga sin desconectar los flexibles. En tal caso la válvula break away se activará automáticamente para evitar incidentes.

Ambas líneas de flexibles serán de 80 [m] de largo, en las cuales se amarra un boyarín de levante para poder operar y conectar al manifold del buque tanque.

vi. Respecto al sistema de fijación de las cañerías rígidas submarinas

Tanto la cañería norte como la cañería sur dispondrán de un total de 40 muertos de fijación tipo tronco piramidal con un peso seco aproximado de 1.7 [tonf] contabilizados desde la zona intermareal a 5 [m] de la línea de más baja marea, hasta una distancia de 12.36 [m] del muerto de término número uno.

La separación de los muertos de fijación será en función de la profundidad de la cañería respecto del fondo marino en el cual irá apoyada. La separación será cada 14 [m] entre el veril de 10 [m] hasta el término del rígido. Para zonas de rompiente las cuales están entre los veriles 9 y 3 [m] la separación entre muertos es de 10 [m].

El sistema de anclaje de la cañería al fondo marino, determinado tanto por el dimensionamiento de los muertos como por su distanciamiento, es suficiente para resistir las solicitaciones externas consideradas y basadas en condiciones extremas de mal tiempo con un período de retorno de oleaje de 100 años. La vida útil esperada de las obras es de 25 años según ROM 3.1-99 (2000).

Para permitir la correcta operación de la válvula Break Away en la línea de flexibles, se diseñó un sistema de elementos de término basado en muertos de hormigón armado. El sistema considera cuatro muertos para cada cañería rígida unidos mediante cañerías de

acero de 6 pulgadas de diámetro dispuestas de tal forma de generar una conexión rígida. Cada muerto tiene un peso seco de 14.08 [tonf]. Este sistema asegura una correcta operación de la válvula Break Away para cualquier dirección de deriva del buque. Los muertos serán de hormigón armado H-30, con un 90% de nivel de confianza.

vii. Respecto al boyarín de levante de cañerías flexibles

El boyarín de levante o izaje tiene el propósito de mantener a flote los extremos de los cabos de amarre y cadenas de levante a una distancia prudente durante las maniobras. A su vez este elemento permite izar los flexibles para conexión con el manifold de la nave para el trasvasije de productos.

Se definió un boyarín de levante para cada flexible, los cuales tienen un volumen de 1500 litros y se realizó la verificación de capacidad de flotación, por lo que se comprobó que son útiles para utilizar en el presente proyecto.

ANEXOS

ANEXO A. CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN EL SECTOR DE ESTUDIO

TABLAS DE INCIDENCIA

Tabla A.1. Tabla de incidencia Hs-Dir.

Rango de Hs [m]	Rango de direcciones [°]									Total	Frec.acumulada
	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N		
	[168.75-191.25[	[191.25-213.75[	[213.75-236.25[	[236.25-258.75[	[258.75-281.25[	[281.25-303.75[	[303.75-326.25[	[326.25-348.75[	[348.75-11.25[
[0,00 - 0,50]	0	0	0	0	7.55	60.60	0.01	0	0	68.16	68.16
]0,50 - 1,00]	0	0	0	0	0	15.53	0.82	0	0	16.36	84.52
]1,00 - 1,50]	0	0	0	0	0	2.92	2.94	0.01	0	5.87	90.39
]1,50 - 2,00]	0	0	0	0	0	1.49	3.27	0.05	0	4.81	95.20
]2,00 - 2,50]	0	0	0	0	0	0.38	2.21	0.04	0	2.62	97.82
]2,50 - 3,00]	0	0	0	0	0	0.07	1.15	0.03	0	1.25	99.07
]3,00 - 3,50]	0	0	0	0	0	0.03	0.55	0.03	0	0.61	99.68
]3,50 - 4,00]	0	0	0	0	0	0	0.18	0.01	0	0.19	99.88
>= 4,00	0	0	0	0	0	0	0.12	0.00	0	0.12	100
Total	0	0	0	0	7.55	81.03	11.24	0.18	0	100	
Frec.acumulada	0	0	0	0	7.55	88.58	99.82	100	100		

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tabla A.2. Tabla de incidencia Tp-Dir.

Rango de Tp [s]	Rango de direcciones [°]									Total	Frec.acumulada
	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N		
	[168.75-191.25[	[191.25-213.75[	[213.75-236.25[	[236.25-258.75[	[258.75-281.25[	[281.25-303.75[	[303.75-326.25[	[326.25-348.75[	[348.75-11.25[
[5,00 - 7,00]	0	0	0	0	0.91	0.04	0.05	0.02	0	1.02	1.02
]7,00 - 9,00]	0	0	0	0	2.52	0.23	0.25	0.07	0	3.07	4.09
]9,00 - 11,00]	0	0	0	0	4.11	1.66	0.99	0.07	0	6.83	10.92
]11,00 - 13,00]	0	0	0	0	0.00	31.48	4.31	0.01	0	35.80	46.73
]13,00 - 15,00]	0	0	0	0	0	39.83	4.6	0.01	0	44.42	91.15
]15,00 - 17,00]	0	0	0	0	0	5.77	0.7	0	0	6.51	97.65
]17,00 - 19,00]	0	0	0	0	0	1.58	0.2	0	0	1.82	99.47
]19,00 - 21,00]	0	0	0	0	0	0.38	0.1	0	0	0.45	99.92
>= 21,00	0	0	0	0	0	0.06	0.03	0	0	0.08	100
Total	0	0	0	0	7.55	81.03	11.24	0.18	0	100	
Frec.acumulada	0	0	0	0	7.55	88.58	99.82	100	100		

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

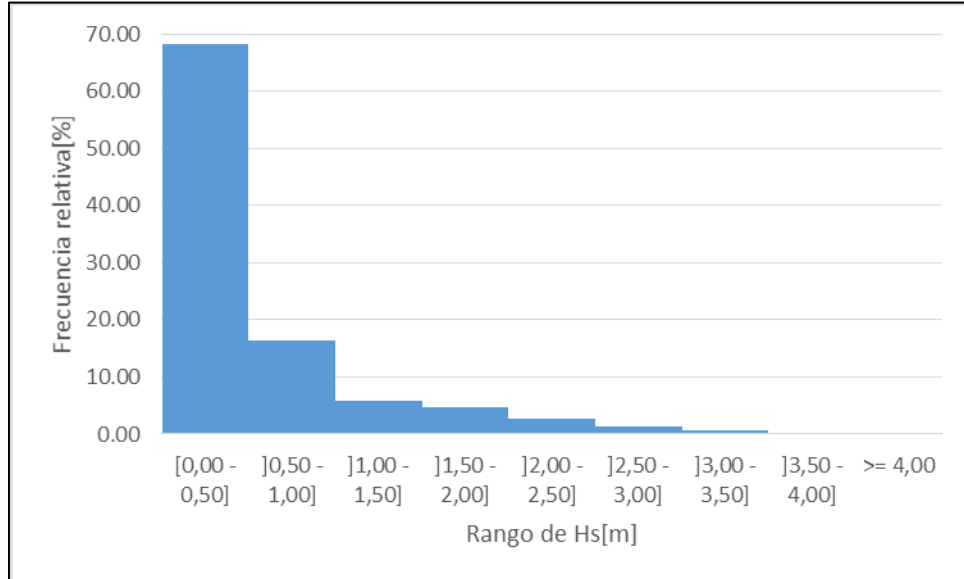
Tabla A.3. Tabla de incidencia Hs [m]-Tp[s]

Rango de Tp[s]	Rango de Hs [m]							Total	Frec. Acumulada
	[0-1]	]1-2]	]2-3]	]3-4]	]4-5]	]5-6]	]6-7]		
[5-7]	0.93	0.07	0.02	0	0	0	0	1.01	1.01
]7-9]	2.68	0.20	0.17	0.03	0	0	0	3.07	4.08
]9-11]	5.22	1.14	0.27	0.18	0.02	0.002	0.001	6.83	10.91
]11-13]	29.28	5.03	1.31	0.17	0.01	0.003	0.001	35.81	46.72
]13-15]	39.18	3.31	1.61	0.29	0.04	0.001	0.001	44.43	91.15
]15-17]	5.76	0.44	0.20	0.07	0.03	0.002	0	6.51	97.65
]17-19]	1.61	0.16	0.05	0.01	0	0	0	1.82	99.47
]19-21]	0.41	0.03	0	0	0	0	0	0.45	99.92
]21-23]	0.07	0.00	0	0	0	0	0	0.07	99.99
]23-25]	0.01	0.00	0	0	0	0	0	0.01	100
Total	85.14	10.37	3.63	0.73	0.106	0.008	0.003	100	
Frec.Acumulada	85.14	95.52	99.15	99.88	99.99	99.997	100		

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

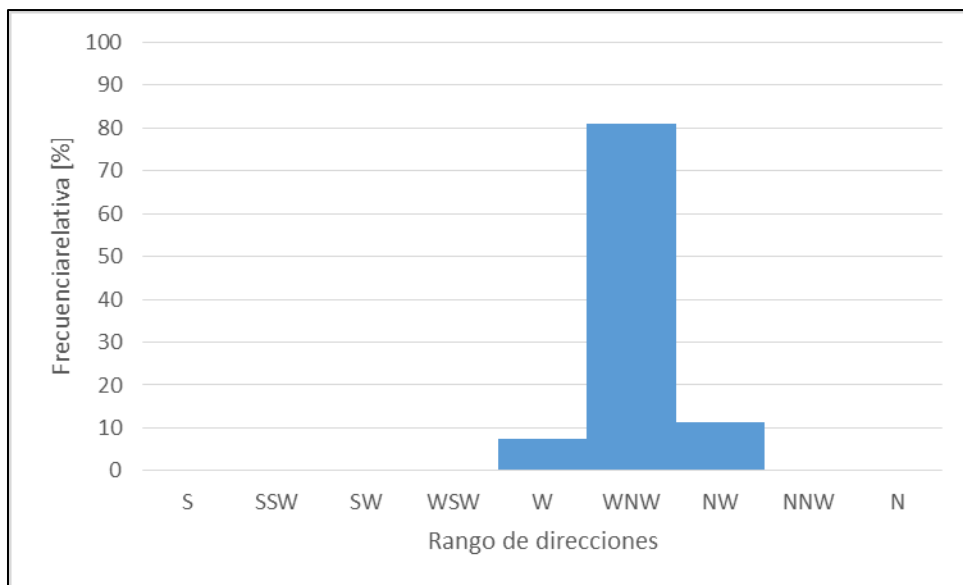
HISTOGRAMAS

Figura A.1. Histograma de Hs [m]



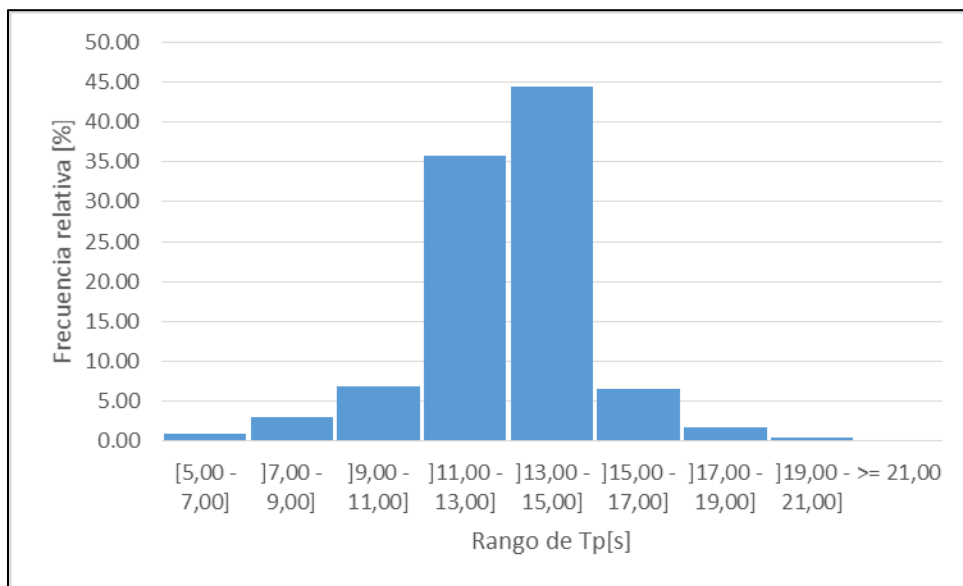
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura A.2. Histograma de Dirección



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

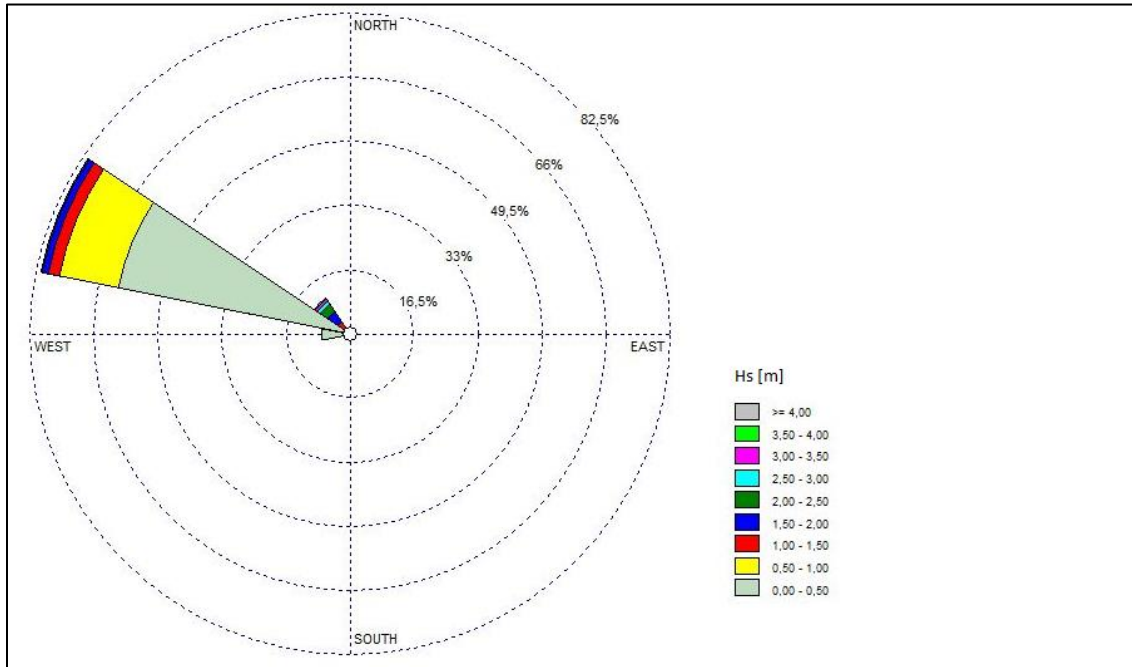
Figura A.3. Histograma de Tp [s]



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

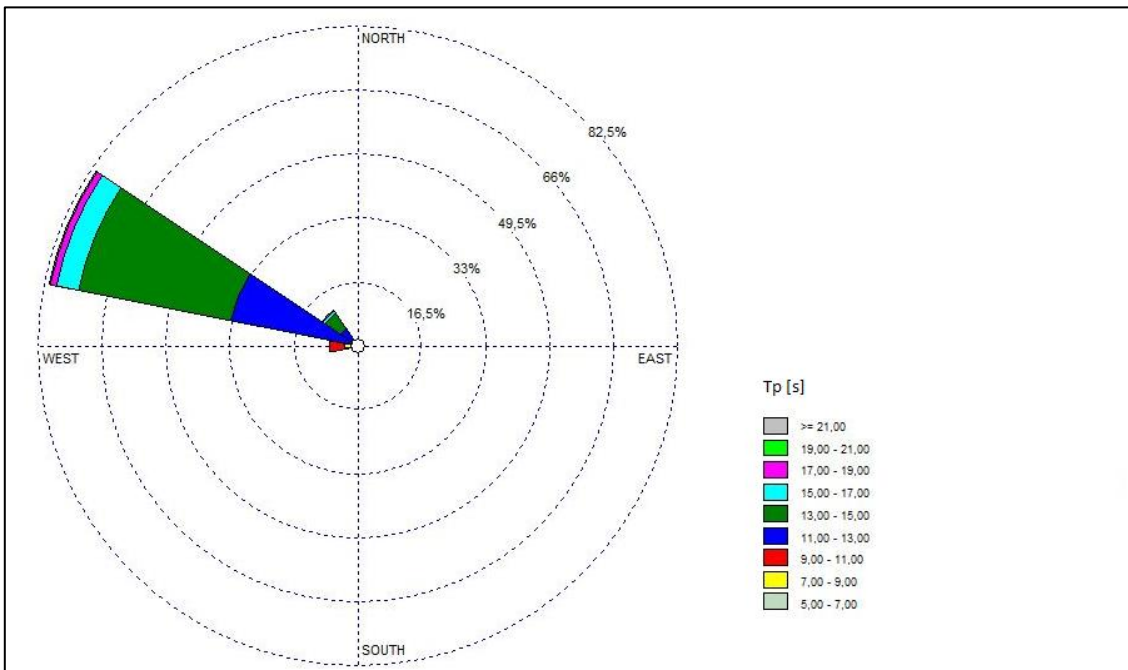
ROSAS DE OLEAJE

Figura A.4. Rosa de altura de oleaje H_s [m]



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura A.5. Rosa de período de oleaje T_p [s]



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

ANEXO B. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

Tabla B.1. Funciones de distribución de probabilidad clima extremo

Año	i	Hs max[m]	Petraukas f(i)				Y Weibull (petraukas)				Gringorten f(i)	Y Gumbel	Bloom f(i)	Y Log Normal	Goda f(i) para Weibull				Y Weibull (Goda)			
			0.75	1	1.4	2	0.75	1	1.4	2	(para gumbel)	(para log normal)	0.75	1	1.4	2	0.75	1	1.4	2		
1997	1	6.74	0.98	0.98	0.98	0.98	6.70	4.04	2.66	1.97	0.98	3.94	0.98	2.03	0.98	0.98	0.98	0.98	6.74	4.18	2.78	2.05
1997	2	6.68	0.95	0.95	0.95	0.95	4.35	2.97	2.16	1.70	0.95	2.90	0.94	1.59	0.95	0.95	0.94	0.94	4.32	3.00	2.19	1.73
2001	3	6.36	0.92	0.91	0.91	0.91	3.37	2.46	1.89	1.56	0.91	2.39	0.91	1.34	0.92	0.91	0.91	0.91	3.34	2.47	1.91	1.57
1988	4	5.55	0.88	0.88	0.88	0.88	2.77	2.13	1.70	1.45	0.88	2.04	0.88	1.16	0.88	0.88	0.87	0.87	2.74	2.13	1.72	1.46
1985	5	5.46	0.85	0.85	0.84	0.84	2.34	1.88	1.56	1.36	0.84	1.77	0.84	1.00	0.85	0.84	0.84	0.84	2.31	1.87	1.57	1.37
2010	6	5.42	0.82	0.81	0.81	0.81	2.02	1.68	1.44	1.29	0.81	1.55	0.81	0.87	0.81	0.81	0.81	0.81	1.98	1.67	1.44	1.29
1981	7	5.36	0.78	0.78	0.78	0.77	1.75	1.51	1.34	1.22	0.77	1.37	0.77	0.75	0.78	0.77	0.77	0.77	1.72	1.50	1.34	1.23
1988	8	5.15	0.75	0.75	0.74	0.74	1.54	1.37	1.24	1.16	0.74	1.20	0.74	0.64	0.74	0.74	0.74	0.74	1.50	1.36	1.24	1.16
2012	9	5.08	0.71	0.71	0.71	0.71	1.35	1.24	1.16	1.11	0.71	1.06	0.71	0.54	0.71	0.71	0.70	0.70	1.32	1.23	1.16	1.11
1985	10	4.91	0.68	0.68	0.67	0.67	1.19	1.13	1.09	1.06	0.67	0.92	0.67	0.44	0.67	0.67	0.67	0.67	1.16	1.12	1.08	1.06
1997	11	4.86	0.65	0.64	0.64	0.64	1.06	1.03	1.02	1.01	0.64	0.80	0.64	0.35	0.64	0.64	0.63	0.63	1.02	1.02	1.01	1.01
2010	12	4.85	0.61	0.61	0.61	0.60	0.93	0.94	0.95	0.96	0.60	0.68	0.60	0.26	0.60	0.60	0.60	0.60	0.90	0.93	0.95	0.96
1986	13	4.76	0.58	0.58	0.57	0.57	0.83	0.86	0.89	0.92	0.57	0.57	0.57	0.17	0.57	0.57	0.57	0.56	0.80	0.84	0.88	0.92
1997	14	4.75	0.55	0.54	0.54	0.54	0.73	0.78	0.83	0.88	0.53	0.47	0.53	0.09	0.53	0.53	0.53	0.53	0.70	0.77	0.83	0.87
1982	15	4.72	0.51	0.51	0.51	0.50	0.64	0.71	0.78	0.84	0.50	0.37	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.61	0.69	0.77	0.83
2003	16	4.66	0.48	0.47	0.47	0.47	0.56	0.64	0.72	0.80	0.47	0.27	0.47	-0.09	0.47	0.46	0.46	0.46	0.54	0.63	0.72	0.79
2013	17	4.65	0.44	0.44	0.44	0.43	0.49	0.58	0.67	0.75	0.43	0.17	0.43	-0.17	0.43	0.43	0.43	0.43	0.47	0.56	0.66	0.75
2010	18	4.65	0.41	0.41	0.40	0.40	0.43	0.52	0.62	0.72	0.40	0.08	0.40	-0.26	0.40	0.39	0.39	0.39	0.40	0.50	0.61	0.71
1995	19	4.65	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37	0.47	0.57	0.68	0.36	-0.01	0.36	-0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.34	0.45	0.56	0.67
1997	20	4.63	0.34	0.34	0.34	0.33	0.32	0.41	0.53	0.64	0.33	-0.11	0.33	-0.44	0.33	0.33	0.32	0.32	0.29	0.40	0.52	0.63
2006	21	4.62	0.31	0.31	0.30	0.30	0.27	0.36	0.48	0.60	0.29	-0.20	0.29	-0.54	0.29	0.29	0.29	0.29	0.24	0.35	0.47	0.59
1992	22	4.59	0.28	0.27	0.27	0.26	0.22	0.32	0.43	0.55	0.26	-0.30	0.26	-0.64	0.26	0.26	0.26	0.26	0.20	0.30	0.42	0.55
1984	23	4.58	0.24	0.24	0.23	0.23	0.18	0.27	0.39	0.51	0.23	-0.40	0.23	-0.75	0.22	0.22	0.22	0.22	0.16	0.25	0.37	0.50
1998	24	4.58	0.21	0.20	0.20	0.20	0.14	0.23	0.34	0.47	0.19	-0.50	0.19	-0.87	0.19	0.19	0.19	0.19	0.12	0.21	0.33	0.46
1982	25	4.57	0.17	0.17	0.17	0.16	0.11	0.19	0.29	0.42	0.16	-0.62	0.16	-1.00	0.15	0.15	0.15	0.15	0.09	0.17	0.28	0.41
2011	26	4.56	0.14	0.14	0.13	0.13	0.08	0.15	0.25	0.37	0.12	-0.74	0.12	-1.16	0.12	0.12	0.12	0.12	0.06	0.13	0.23	0.36
2012	27	4.54	0.11	0.10	0.10	0.09	0.05	0.11	0.20	0.31	0.09	-0.89	0.09	-1.34	0.08	0.08	0.08	0.08	0.04	0.09	0.18	0.30
2011	28	4.52	0.07	0.07	0.06	0.06	0.03	0.07	0.14	0.25	0.05	-1.07	0.06	-1.59	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.12	0.23
2010	29	4.52	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.08	0.16	0.02	-1.37	0.02	-2.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.05	0.13

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

ANEXO C. MATRICES DE COMPARACIÓN

MATRIZ DE COMPARACIÓN “POR PAREJAS” PARA EL NIVEL JERÁRQUICO 2

Para la obtención de la ponderación de factores que dan valor de importancia a cada criterio, fueron comparados cada uno de los criterios de selección de alternativa, a los cuales se les asignó una letra:

A=Costo de la obra, B=Factibilidad constructiva, C=Seguridad de la operación, D=Mantenimiento, E=Impacto en el sitio.

Se definió para cada uno de los criterios un valor según la escala del método AHP.

A=5B (A fuertemente más importante que B)

A=3C (A moderadamente más importante que C)

A=9D (A importancia extrema sobre D)

A=7E (A mucho más fuerte que E)

4B=C (C fuerte a moderadamente más importante que B)

B=5D (B fuertemente más importante que D)

B=3E (B moderadamente más importante que E)

C=7D (C mucho más importante que D)

C=5E (C fuertemente más importante que E)

D=3E (D moderadamente más importante que E)

A continuación se presenta la matriz de comparación “por parejas” para el nivel jerárquico 2, junto con la matriz normalizada (Criterio/Total), y la matriz de ponderación (promedio por fila de la matriz normalizada).

		A	B	C	D	E	Matriz normalizada					Ponderación
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
Criterios	A: Costo de la obra	1	5	3	9	7	0.56	0.47	0.65	0.36	0.43	0.50
	B: Factibilidad constructiva	1/5	1	1/4	5	3	0.11	0.09	0.05	0.20	0.18	0.13
	C: Seguridad de la operación	1/3	4	1	7	5	0.19	0.38	0.22	0.28	0.31	0.27
	D: Mantenimiento	1/9	1/5	1/7	1	1/3	0.06	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03
	E: Impacto en el sitio	1/7	1/3	1/5	3	1	0.08	0.03	0.04	0.12	0.06	0.07
Total		1.79	10.53	4.59	25	16						

Para verificar si la ponderación de factores es consistente, se debe verificar lo siguiente:

SI CR=0 CONSISTENTE

Si CR <=1 INCONSISTENCIA ADMISIBLE

Si CR >0.1 INCONSISTENCIA INADMISIBLE

Donde:

n: 5 (número de criterios)

nmax: suma de la multiplicación de matriz de comparación por ponderación

AxP			
2.744	$CI=(n_{max}-n)/(n-1)$		0.12
0.671	$RI=1.98*(n-2)/2$		1.188
1.533	$CR=CI/RI$		0.0977
0.177			
0.339			
5.464	TOTAL		

CR= 0.0977 por lo tanto se verifica inconsistencia admisible (siempre hay un grado de inconsistencia)

MATRIZ DE COMPARACIÓN “POR PAREJAS” PARA EL NIVEL JERÁRQUICO 3

Respecto al **criterio de costo de obra**, la alternativa 1 es la alternativa más económica. Por lo tanto se consideró con un factor 5 (fuertemente más importante un elemento que en otro) por sobre la alternativa 2 y la alternativa 3. Se consideró además un factor 3 (moderadamente más importante un elemento sobre otro) para la alternativa 2 por sobre la alternativa 3, ya que la alternativa 2 es más económica debido a las profundidades que se fondearían los elementos.

A continuación se presentan los factores para el criterio de costo de obra, junto con la matriz normalizada (n/total) y el vector promedio (promedio de los valores de la matriz normalizada).

Criterio: Costo de la obra				Matriz normalizada			Vector promedio
Alternativas	i	ii	iii				
i	1	5	5	0.71	0.79	0.56	0.69
ii	1/5	1	3	0.14	0.16	0.33	0.21
iii	1/5	1/3	1	0.14	0.05	0.11	0.10
Total	1.4	6.3	9				

Respecto al **criterio de seguridad en la operación**, se consideró la alternativa más segura la alternativa 2, debido a que tiene mayor número de elementos de apoyo (5 boyas y 3 anclas). Al tener elementos de apoyo al costado del buque tanque hace que proteja al viento que golpea en dirección SW. Se consideró que la alternativa 2 tiene un factor 5 (fuertemente más importante un elemento que en otro) sobre la alternativa 1 y factor 3 (moderadamente más importante un elemento que el otro) sobre la alternativa 3. Además se consideró un factor 4 (valor intermedio entre moderadamente y fuertemente más importante un elemento que el otro) para la alternativa 3 sobre la alternativa 1, debido a que la alternativa 3 posee 5 boyas de amarre, las cuales están ancladas al fondo marino, mientras que la alternativa 1 debe ubicar las anclas propias del buque.

A continuación se presentan los factores para el criterio de seguridad de operación, junto con la matriz normalizada (n/total) y el vector promedio (promedio de los valores de la matriz normalizada).

Criterio: Seguridad operación				Matriz normalizada			Vector promedio
Alternativas	i	ii	iii				
i	1	1/5	1/4	0.1	0.13	0.06	0.10
ii	5	1	3	0.5	0.65	0.71	0.62
iii	4	1/3	1	0.4	0.22	0.24	0.28
Total	10	1.53	4.25				

Respecto al **criterio impacto en el sitio**, se consideró que la alternativa 1 es la que menos impacto tiene en el sitio debido a que tiene solo 3 boyas de amarre. Por lo tanto se le aplicó un factor 3 (moderadamente más importante un elemento que el otro) sobre la alternativa 2 y la alternativa 3. En cuanto a la alternativa 2 y la alternativa 3, se consideró que poseen el mismo impacto debido a que ambas alternativas tienen 5 boyas de amarre.

A continuación se presentan los factores para el criterio de impacto en el sitio, junto con la matriz normalizada (n/total) y el vector promedio (promedio de los valores de la matriz normalizada).

Criterio: Impacto en el sitio				Matriz normalizada			Vector promedio
Alternativas	i	ii	iii				
i	1	3	3	0.6	0.6	0.6	0.6
ii	1/3	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2
iii	1/3	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2
Total	1.67	5	5				

Respecto al **criterio de factibilidad constructiva**, se consideró la alternativa 1 como la más factible en términos de construcción, debido a que esta alternativa posee una menor cantidad de boyas, y fondeo de las pernadas de trabajo se realiza a una menor profundidad, por lo que facilita el trabajo de los buzos a la hora de instalar dichos elementos. Se aplicó un factor 5 (fuertemente más importante un elemento que en otro) de la alternativa 1 sobre la alternativa 2, y un factor 7 (mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro) de la alternativa 1 sobre la alternativa 3. En cuanto a la alternativa 2, esta se consideró con un factor 3 (moderadamente más importante un elemento que el otro) sobre la alternativa 3, esto debido a que la alternativa 3 posee dos boyas en la proa del buque, las cuales deben ser fondeadas a una mayor profundidad, lo cual dificulta el proceso de instalación de los elementos de fondeo.

A continuación se presentan los factores para el criterio de factibilidad constructiva, junto con la matriz normalizada (n/total) y el vector promedio (promedio de los valores de la matriz normalizada).

Criterio: Factibilidad constructiva				Matriz normalizada			Vector promedio
Alternativas	i	ii	iii				
i	1	5	7	0.74	0.79	0.64	0.72
ii	1/5	1	3	0.15	0.16	0.27	0.19
iii	1/7	1/3	1	0.11	0.05	0.09	0.08
Total	1.34	6.33	11				

Respecto al **criterio de mantención**, se consideró la alternativa 1 como la más factible en términos de construcción, debido a que esta alternativa posee una menor cantidad de boyas, y fondeo de las pernadas de trabajo se realiza a una menor profundidad, por lo que facilita el trabajo de los buzos a la hora de instalar dichos elementos. Se aplicó un factor 5

(fuertemente más importante un elemento que en otro) de la alternativa 1 sobre la alternativa 2, y un factor 7 (mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro) de la alternativa 1 sobre la alternativa 3. En cuanto a la alternativa 2, esta se consideró con un factor 3 (moderadamente más importante un elemento que el otro) sobre la alternativa 3, esto debido a que la alternativa 3 posee dos boyas en la proa del buque, las cuales deben ser fondeadas a una mayor profundidad, lo cual dificulta el proceso de instalación de los elementos de fondeo.

A continuación se presentan los factores para el criterio de mantención, junto con la matriz normalizada (n/total) y el vector promedio (promedio de los valores de la matriz normalizada).

Criterio: Mantención				Matriz normalizada			Vector promedio
Alternativas	i	ii	iii				
i	1	5	6	0.73	0.79	0.60	0.71
ii	1/5	1	3	0.15	0.16	0.30	0.20
iii	1/6	1/3	1	0.12	0.05	0.10	0.09
Total	1.37	6	10				

ANEXO D. CALCULO DE FUERZAS SOBRE EL BUQUE

A continuación se presentan los cálculos obtenidos de las solicitaciones que los agentes medioambientales ejercen sobre las áreas transversales y longitudinales de la nave de diseño.

PARÁMETROS GENERALES

Peso específico aire:

$$\rho_a := 1.225 \cdot 10^{-3} \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Peso específico de agua de mar:

$$\rho_{am} := 1.025 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Profundidad a popa:

$$d_p := 17\text{m}$$

Profundidad a proa:

$$d_{pr} := 35\text{m}$$

Profundidad media:

$$d_m := \frac{d_p + d_{pr}}{2}$$

$$d_m = 26\text{m}$$

PARÁMETROS DIMENSIONALES NAVE DE DISEÑO

Eslora nave LOA:

$$L_t := 242.8\text{m}$$

Eslora entre perpendiculares:

$$L_{pp} := 227.92\text{m}$$

Manga nave:

$$B := 32.21\text{m}$$

Puntal nave:

$$P := 18\text{m}$$

Calado en carga:

$$D_C := 13.62\text{m}$$

Calado en lastre:

$$D_l := 7\text{m}$$

Superficie Lateral Caserio:

$$h_l := 630\text{m}^2$$

Superficie Frontal Caserio:

$$h_f := 578\text{m}^2$$

CÁLCULO DE LAS ÁREAS EXPUESTAS

Áreas expuestas al Viento

$$\text{Area longitudinal en lastre: } A_{Vll} := L_t \cdot (P - D_l) + h_l \quad A_{Vll} = 3300.8 \text{ m}^2$$

$$\text{Area longitudinal en carga: } A_{Vlc} := L_t \cdot (P - D_c) + h_l \quad A_{Vlc} = 1693.5 \text{ m}^2$$

$$\text{Area transversal en lastre: } A_{Vtl} := B \cdot (P - D_l) + h_f \quad A_{Vtl} = 932.3 \text{ m}^2$$

$$\text{Area transversal en carga: } A_{Vtc} := B \cdot (P - D_c) + h_f \quad A_{Vtc} = 719.1 \text{ m}^2$$

Áreas expuestas a la Corriente

Áreas expuestas a la presión por corrientes:

$$\text{Area longitudinal en lastre: } A_{cll} := L_{pp} \cdot D_l \quad A_{cll} = 1595.4 \text{ m}^2$$

$$\text{Area longitudinal en carga: } A_{clc} := L_{pp} \cdot D_c \quad A_{clc} = 3104.3 \text{ m}^2$$

$$\text{Area transversal en lastre: } A_{ctl} := B \cdot D_l \quad A_{ctl} = 225.5 \text{ m}^2$$

$$\text{Area transversal en carga: } A_{ctc} := B \cdot D_c \quad A_{ctc} = 438.7 \text{ m}^2$$

Áreas expuestas a la fricción por corrientes:

$$\text{Area long.mojada en lastre: } A_{clml} := L_{pp} \cdot (B + 2 \cdot D_l) \quad A_{clml} = 10532.2 \text{ m}^2$$

$$\text{Area long.mojada en carga: } A_{clmc} := L_{pp} \cdot (B + 2 \cdot D_c) \quad A_{clmc} = 13549.8 \text{ m}^2$$

$$\text{Area trasv.mojada en lastre: } A_{ctml} := B \cdot (L_{pp} + 2 \cdot D_l) \quad A_{ctml} = 7792.2 \text{ m}^2$$

$$\text{Area trasv.mojada en carga: } A_{ctmc} := B \cdot (L_{pp} + 2 \cdot D_c) \quad A_{ctmc} = 8218.7 \text{ m}^2$$

FUERZAS DE VIENTO SOBRE EL BUQUE

Parámetros de diseño

Factor de Forma: $C_{Vf} := 1.3$ (conservador)

Velocidad viento: $V_{vr} := 30\text{knot}$

Ángulos dirección del viento para análisis:

Ángulos	Coef. exc. lastre	Coef. exc. carga
$\alpha_{vr_1} := 0^\circ$	$K_{evL_1} := 0$	$K_{evC_1} := 0$
$\alpha_{vr_2} := 30^\circ$	$K_{evL_2} := 0.16$	$K_{evC_2} := -0.10$
$\alpha_{vr_3} := 60^\circ$	$K_{evL_3} := 0.05$	$K_{evC_3} := -0.12$
$\alpha_{vr_4} := 90^\circ$	$K_{evL_4} := -0.04$	$K_{evC_4} := -0.16$
$\alpha_{vr_5} := 120^\circ$	$K_{evL_5} := -0.18$	$K_{evC_5} := -0.27$
$\alpha_{vr_6} := 150^\circ$	$K_{evL_6} := -0.33$	$K_{evC_6} := -0.37$
$\alpha_{vr_7} := 180^\circ$	$K_{evL_7} := 0$	$K_{evC_7} := 0$

Fuente: Tabla 4.1 ROM 3.1-99 Parte 4

Ángulo fuerza resultante en lastre: $\phi_{vl} := \text{atan} \left(\frac{A_{vll}}{A_{vtl}} \tan(\alpha_{vr}) \right)$

Ángulo fuerza resultante en carga: $\phi_{vc} := \text{atan} \left(\frac{A_{vlc}}{A_{vtc}} \tan(\alpha_{vr}) \right)$

Cálculo de Fuerzas

Fuerza resultante en lastre:

$$R_{VL_1} := \frac{\rho_a}{2 \cdot g} \cdot C_{Vf} \cdot V_{vr}^2 \cdot A_{vtl} \cdot \cos(\alpha_{vr_1})^2 + A_{vll} \cdot \sin(\alpha_{vr_1})^2 \quad R_{VL_1} = 176819.1 \cdot N$$

$$R_{VL_2} := \frac{\rho_a}{2 \cdot g} \cdot C_{Vf} \cdot V_{vr}^2 \cdot A_{vtl} \cdot \cos(\alpha_{vr_2})^2 + A_{vll} \cdot \sin(\alpha_{vr_2})^2 \quad R_{VL_2} = 289119.3 \cdot N$$

$$R_{VL_3} := \frac{\rho_a}{2 \cdot g} \cdot C_{Vf} \cdot V_{vr}^2 \cdot A_{vtl} \cdot \cos(\alpha_{vr_3})^2 + A_{vll} \cdot \sin(\alpha_{vr_3})^2 \quad R_{VL_3} = 513719.7 \cdot N$$

$$R_{VL_4} := \frac{\rho_a}{2 \cdot g} \cdot C_{Vf} \cdot V_{vr}^2 \cdot A_{vtl} \cdot \cos(\alpha_{vr_4})^2 + A_{vll} \cdot \sin(\alpha_{vr_4})^2 \quad R_{VL_4} = 626019.9 \cdot N$$

Fuerza transversal en lastre:

$$F_{vtl_1} := R_{VL_1} \cdot \sin(\phi_{vl_1}) \quad F_{vtl_1} = 0 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{vtl_2} := R_{VL_2} \cdot \sin(\phi_{vl_2}) \quad F_{vtl_2} = 26.5 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{vtl_3} := R_{VL_3} \cdot \sin(\phi_{vl_3}) \quad F_{vtl_3} = 51.7 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{vtl_4} := R_{VL_4} \cdot \sin(\phi_{vl_4}) \quad F_{vtl_4} = 63.8 \cdot \text{tonf}$$

Fuerza longitudinal en lastre:

$$F_{vll_1} := R_{VL_1} \cdot \cos(\phi_{vl_1}) \quad F_{vll_1} = 18 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{vll_2} := R_{VL_2} \cdot \cos(\phi_{vl_2}) \quad F_{vll_2} = 13 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{vll_3} := R_{VL_3} \cdot \cos(\phi_{vl_3}) \quad F_{vll_3} = 8.4 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{vll_4} := R_{VL_4} \cdot \cos(\phi_{vl_4}) \quad F_{vll_4} = 0 \cdot \text{tonf}$$

Momento resultante en lastre:

$$\begin{aligned}
M_{vll_1} &:= F_{vtl_1} \cdot K_{evL_1} \cdot L_t & M_{vll_1} &= 0 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \\
M_{vll_2} &:= F_{vtl_2} \cdot K_{evL_2} \cdot L_t & M_{vll_2} &= 1028.8 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \\
M_{vll_3} &:= F_{vtl_3} \cdot K_{evL_3} \cdot L_t & M_{vll_3} &= 627.7 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \\
M_{vll_4} &:= F_{vtl_4} \cdot K_{evL_4} \cdot L_t & M_{vll_4} &= -620 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \\
M_{vll_5} &:= F_{vtl_5} \cdot K_{evL_5} \cdot L_t & M_{vll_5} &= 2259.6 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \\
M_{vll_6} &:= F_{vtl_6} \cdot K_{evL_6} \cdot L_t & M_{vll_6} &= 2121.9 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}
\end{aligned}$$

Fuerza resultante en carga:

$$\begin{aligned}
R_{vc_1} &:= \frac{\rho_a}{2 \cdot g} \cdot C_{vf} \cdot V_{vr}^2 \cdot A_{vtc} \cdot \cos(\alpha_{vr_1})^2 + A_{vlc} \cdot \sin(\alpha_{vr_1})^2 & R_{vc_1} &= 136378.5 \cdot \text{N} \\
R_{vc_2} &:= \frac{\rho_a}{2 \cdot g} \cdot C_{vf} \cdot V_{vr}^2 \cdot A_{vtc} \cdot \cos(\alpha_{vr_2})^2 + A_{vlc} \cdot \sin(\alpha_{vr_2})^2 & R_{vc_2} &= 182578.2 \cdot \text{N} \\
R_{vc_3} &:= \frac{\rho_a}{2 \cdot g} \cdot C_{vf} \cdot V_{vr}^2 \cdot A_{vtc} \cdot \cos(\alpha_{vr_3})^2 + A_{vlc} \cdot \sin(\alpha_{vr_3})^2 & R_{vc_3} &= 274977.6 \cdot \text{N} \\
R_{vc_4} &:= \frac{\rho_a}{2 \cdot g} \cdot C_{vf} \cdot V_{vr}^2 \cdot A_{vtc} \cdot \cos(\alpha_{vr_4})^2 + A_{vlc} \cdot \sin(\alpha_{vr_4})^2 & R_{vc_4} &= 321177.3 \cdot \text{N}
\end{aligned}$$

Fuerza transversal en carga

$$\begin{aligned}
F_{vtc_1} &:= R_{vc_1} \cdot \sin(\phi_{vc_1}) & F_{vtc_1} &= 0 \cdot \text{tonf} \\
F_{vtc_2} &:= R_{vc_2} \cdot \sin(\phi_{vc_2}) & F_{vtc_2} &= 15 \cdot \text{tonf} \\
F_{vtc_3} &:= R_{vc_3} \cdot \sin(\phi_{vc_3}) & F_{vtc_3} &= 27.2 \cdot \text{tonf} \\
F_{vtc_4} &:= R_{vc_4} \cdot \sin(\phi_{vc_4}) & F_{vtc_4} &= 32.8 \cdot \text{tonf}
\end{aligned}$$

Fuerza longitudinal en carga

$$F_{vlc_1} := R_{vc_1} \cdot \cos(\phi_{vc_1}) \quad F_{vlc_1} = 13.9 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{vlc_2} := R_{vc_2} \cdot \cos(\phi_{vc_2}) \quad F_{vlc_2} = 11 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{vlc_3} := R_{vc_3} \cdot \cos(\phi_{vc_3}) \quad F_{vlc_3} = 6.7 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{vlc_4} := R_{vc_4} \cdot \cos(\phi_{vc_4}) \quad F_{vlc_4} = 0 \cdot \text{tonf}$$

Momento resultante en carga

$$M_{vlc_1} := F_{vtc_1} \cdot K_{evC_1} \cdot L_t \quad M_{vlc_1} = 0 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{vlc_2} := F_{vtc_2} \cdot K_{evC_2} \cdot L_t \quad M_{vlc_2} = -364.2 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{vlc_3} := F_{vtc_3} \cdot K_{evC_3} \cdot L_t \quad M_{vlc_3} = -793.5 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{vlc_4} := F_{vtc_4} \cdot K_{evC_4} \cdot L_t \quad M_{vlc_4} = -1272.3 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{vlc_5} := F_{vtc_5} \cdot K_{evC_5} \cdot L_t \quad M_{vlc_5} = 1785.3 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

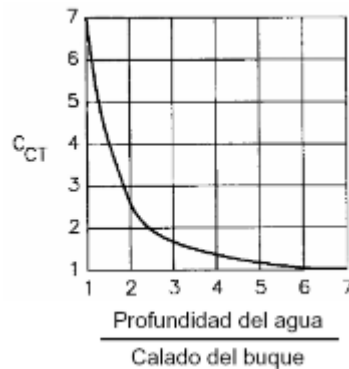
$$M_{vlc_6} := F_{vtc_6} \cdot K_{evC_6} \cdot L_t \quad M_{vlc_6} = 1347.4 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

FUERAS DE CORRIENTE SOBRE EL BUQUE

Parámetros de diseño

En lastre: $\frac{d_m}{D_l} = 3.7$

En carga: $\frac{d_m}{D_c} = 1.9$



Factor de forma transversal en lastre:	$C_{ctl} := 1.3$	Tabla 4.2 ROM 3.1-99 Parte 4
Factor de forma transversal en carga:	$C_{ctc} := 2.4$	Tabla 4.2 ROM 3.1-99 Parte 4
Factor de forma longitudinal en lastre:	$C_{cll} := 0.2$	P. Bulbo:0.2;P. Convencional:0.6
Factor de forma longitudinal en carga:	$C_{clc} := 0.2$	P. Bulbo:0.2;P. Convencional:0.6
Velocidad relativa de corriente:	$V_{cr} := 0.5\text{knot}$	Sección 4.2.3
Ángulo dirección de la corriente:	$\alpha_{cr} := 20^\circ$	Sección 5.1.2
Coefficiente de excentricidad:	$K_{ec} := 0.13$	Tabla 4.2 ROM 3.1-99 Parte 4

Ángulo fuerza resultante lastre: $\phi_{cl} := \text{atan}\left(\frac{A_{ccl}}{A_{ctl}} \tan(\alpha_{cr})\right)$ $\phi_{cl} = 68.8 \cdot \text{deg}$

Ángulo fuerza resultante lastre: $\phi_{cc} := \text{atan}\left(\frac{A_{clc}}{A_{ctc}} \tan(\alpha_{cr})\right)$ $\phi_{cc} = 68.8 \cdot \text{deg}$

Cálculo de fuerzas:

Fuerza resultante en lastre: $R_{cl} := \frac{\rho_{am}}{2 \cdot g} \cdot V_{cr}^2 \cdot \frac{C_{ccl} \cdot A_{ctl} \cdot \cos(\alpha_{cr})^2 + C_{ctl} \cdot A_{ccl} \cdot \sin(\alpha_{cr})^2}{\cos(\phi_{cl} - \alpha_{cr})}$ $R_{cl} = 1.5 \cdot \text{tonf}$

Fuerza transversal en lastre: $F_{ctl} := R_{cl} \cdot \sin(\phi_{cl})$ $F_{ctl} = 1 \cdot \text{tonf}$

Fuerza longitudinal en lastre: $F_{ccl} := R_{cl} \cdot \cos(\phi_{cl})$ $F_{ccl} = 0.5 \cdot \text{tonf}$

Momento resultante en lastre: $M_{ccl} := F_{ccl} \cdot K_{ec} \cdot L_t$ $M_{ccl} = 16.9 \text{ m} \cdot \text{tonf}$

Fuerza resultante en carga: $R_{cc} := \frac{\rho_{am}}{2 \cdot g} \cdot V_{cr}^2 \cdot \frac{C_{clc} \cdot A_{ctc} \cdot \cos(\alpha_{cr})^2 + C_{ctc} \cdot A_{clc} \cdot \sin(\alpha_{cr})^2}{\cos(\phi_{cc} - \alpha_{cr})}$ $R_{cc} = 5 \cdot \text{tonf}$

Fuerza transversal en carga: $F_{ctc} := R_{cc} \cdot \sin(\phi_{cc})$ $F_{ctc} = 4.6 \cdot \text{tonf}$

Fuerza longitudinal en carga: $F_{clc} := R_{cc} \cdot \cos(\phi_{cc})$ $F_{clc} = 1.8 \cdot \text{tonf}$

Momento resultante en carga: $M_{clc} := F_{ctc} \cdot K_{ec} \cdot L_t$ $M_{clc} = 146.5 \text{ m} \cdot \text{tonf}$

FUERZAS DE FRICCIÓN DE LA CORRIENTE SOBRE EL BUQUE

Parámetros de diseño

Coeficiente de rozamiento:

$$C_r := 0.004$$

Buque en servicio

Ángulo fuerza resultante lastre: $\phi_{cfl} := \operatorname{atan}\left(\frac{A_{ctml}}{A_{clml}} \tan(\alpha_{cr})^2\right)$ $\phi_{cfl} = 5.6 \cdot \text{deg}$

Ángulo fuerza resultante carga: $\phi_{cfc} := \operatorname{atan}\left(\frac{A_{ctmc}}{A_{clmc}} \tan(\alpha_{cr})^2\right)$ $\phi_{cfc} = 4.6 \cdot \text{deg}$

Cálculo de fuerzas:

Fuerza transversal en lastre: $F_{cftl} := \frac{\rho_{am}}{2 \cdot g} \cdot C_r \cdot V_{cr}^2 \cdot A_{ctml} \cdot \sin(\alpha_{cr}) \cdot \sin(\alpha_{cr})$ $F_{cftl} = 0.013 \cdot \text{tonf}$

Fuerza transversal en carga: $F_{cftc} := \frac{\rho_{am}}{2 \cdot g} \cdot C_r \cdot V_{cr}^2 \cdot A_{ctmc} \cdot \sin(\alpha_{cr}) \cdot \sin(\alpha_{cr})$ $F_{cftc} = 0.013 \cdot \text{tonf}$

Fuerza longitudinal en lastre: $F_{cfll} := \frac{\rho_{am}}{2 \cdot g} \cdot C_r \cdot V_{cr}^2 \cdot A_{clml} \cdot \cos(\alpha_{cr}) \cdot \cos(\alpha_{cr})$ $F_{cfll} = 0.129 \cdot \text{tonf}$

Fuerza longitudinal en carga: $F_{cflc} := \frac{\rho_{am}}{2 \cdot g} \cdot C_r \cdot V_{cr}^2 \cdot A_{clmc} \cdot \cos(\alpha_{cr}) \cdot \cos(\alpha_{cr})$ $F_{cflc} = 0.165 \cdot \text{tonf}$

FUERZAS DE OLEAJE SOBRE EL BUQUE

Parámetros de diseño

Velocidad del buque:

$$V_b := \frac{m}{s}$$

Dirección de oleaje incidente:

$$\alpha_{wb} := 292.5^\circ$$

Altura de ola significativa:

$$H_s := 1.5m$$

Periodo de la ola:

$$T_w := 13s$$

Longitud de la ola:

$$L_w := 196.3m \quad (\text{planilla excel})$$

Ángulo entre crujía y olas:

$$\alpha := 22.5 \text{deg}$$

Proyección de la ola aparente:

$$D' := L_{pp} \cdot \sin(\alpha) + B \cdot \cos(\alpha)$$

$$D' = 117 \text{ m}$$

Periodo de la ola aparente:

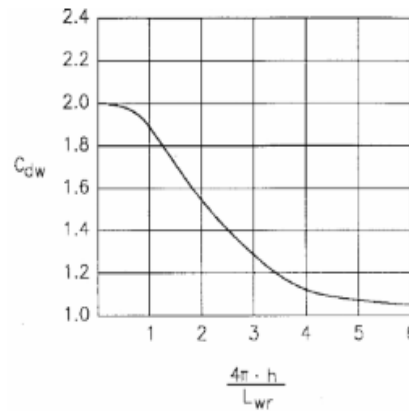
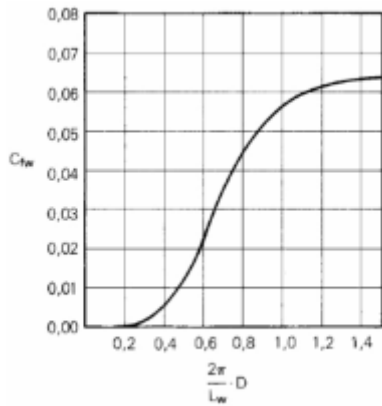
$$T_{wr} := \frac{1}{\frac{1}{T_w} + \frac{V_b \cdot \cos(\alpha_{wb})}{L_w}}$$

$$T_{wr} = 13 \text{ s}$$

Longitud de la ola aparente:

$$L_{wr} := L_w \cdot \frac{T_{wr}}{T_w}$$

$$L_{wr} = 191 \text{ m}$$



en lastre: $\frac{2 \cdot \pi}{L_w} \cdot D_l = 0.2$

$$\frac{4\pi}{L_{wr}} \cdot d_m = 1.7$$

en carga: $\frac{2 \cdot \pi}{L_w} \cdot D_c = 0.4$

Coefficiente de flotación lastre:

$$C_{fwl} := 0.001$$

(gráfica)

Coefficiente de flotación carga:

$$C_{fwc} := 0.005$$

(gráfica)

Coefficiente de profundidad:

$$C_{dw} := 1.55$$

(gráfica)

Cálculo de fuerzas:

Fuerza transversal en lastre: $F_{wtl} := C_{fwl} \cdot C_{dw} \cdot \rho_{am} \cdot H_s^2 \cdot D' \cdot (\sin(\alpha))$ $F_{wtl} = 0.2 \cdot \text{tonf}$

Fuerza longitudinal en lastre: $F_{wll} := C_{fwl} \cdot C_{dw} \cdot \rho_{am} \cdot H_s^2 \cdot D' \cdot (\cos(\alpha))$ $F_{wll} = 0.4 \cdot \text{tonf}$

Fuerza transversal en carga: $F_{wtc} := C_{fwc} \cdot C_{dw} \cdot \rho_{am} \cdot H_s^2 \cdot D' \cdot \sin(\alpha)$ $F_{wtc} = 0.8 \cdot \text{tonf}$

Fuerza longitudinal en carga: $F_{wlc} := C_{fwc} \cdot C_{dw} \cdot \rho_{am} \cdot H_s^2 \cdot D' \cdot \cos(\alpha)$ $F_{wlc} = 1.9 \cdot \text{tonf}$

ANEXO E. VERIFICACIÓN DE ELEMENTOS DE FONDEO

i. VERIFICACIÓN BOYA Nº1 (ALETA ESTRIBOR)

Parámetros generales

Peso específico agua de mar:	$\rho_{am} := 1.025 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	
Peso específico de hormigón armado:	$\rho_{ha} := 2.5 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	
Peso específico de acero	$\rho_a := 7.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	
Peso específico de hormigón armado sumergido:	$\rho_{has} := \rho_{ha} - \rho_{am}$	$\rho_{has} = 1.5 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$
Peso específico de acero sumergido:	$\rho_{as} := \rho_a - \rho_{am}$	$\rho_{as} = 6.8 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$
Profundidad en punto de amarre:	$d_m := 14\text{m}$	
Rango máximo de marea:	$R_m := 2\text{m}$	
Altura de ola significativa:	$H_s := 1.5\text{m}$	
Coefficiente de roce muerto/suelo fondo arena:	$\mu_{ms} := 0.69$	Tabla 4.3-2 NAVFAC (2012)
Coefficiente de roce cadena/suelo fondo arena:	$\mu_{cs} := 0.6$	Tabla 4.3-2 NAVFAC (2012)

Fuerzas de diseño

Tensión dirección x:	$T_x := 16.24\text{tonf}$	Sección 5.4.2
Tensión dirección y:	$T_y := 27.98\text{tonf}$	Sección 5.4.2
Tensión en espía:	$T_e := \sqrt{T_x^2 + T_y^2}$	$T_e = 32.4 \cdot \text{tonf}$
Fuerza horizontal de diseño en boya Nº1:	$P_e := T_e$	$P_e = 32.4 \cdot \text{tonf}$
Ángulo entre espía y pernada de trabajo:	$\theta := 45^\circ$	
Fuerza horizontal en pernada de trabajo:	$T_p := \frac{P_e}{2 \cos(\theta)}$	$T_p = 22.9 \cdot \text{tonf}$

Parámetros dimensionales de anclaje de la línea de fondeo

Volumen de muertos de término:	$V_{mi} := 17m^3$	Proceso de iteración
Peso de muertos de término:	$P_{mi} := V_{mi} \cdot \rho_{ha}$	$P_{mi} = 42.5 \cdot \text{tonf}$
Peso sumergido de muertos de término:	$P_{smi} := V_{mi} \cdot \rho_{has}$	$P_{smi} = 25.1 \cdot \text{tonf}$
Cantidad de muertos de término:	$N_{mt} := 2$	

Configuración muerto de término pernada 1 y 2

Base:	$B := 3.2m$		
Altura 1:	$H_1 := 0.7m$		
Altura 2:	$H_2 := 2m$		
Ancho:	$A_n := 2.2m$		
Altura key shear:	$z_s := 0.1 \cdot B$	$z_s = 0.32 m$	NAVFAC(2012)
Numero key shear:	$n := 2$		

Volumen muerto término: $V_{mi} := (0.5 \cdot H_1 \cdot B + B \cdot H_2 + z_s^2 \cdot n) \cdot A_n$ $V_{mi} = 17m^3$ Ok

Configuración muerto retendida

Base:	$B_r := 3m$		
Altura :	$H_r := 2.2m$		
Ancho:	$A_r := 2.5m$		
Altura key shear:	$z_s := 0.1 \cdot B$	$z_s = 0.32 m$	NAVFAC(2012)
Numero key shear:	$n := 2$		

Volumen muerto término: $V_r := B_r \cdot H_r + z_s^2 \cdot n \cdot A_r$ $V_r = 17m^3$ Ok

Verificación de resistencia

Fuerza de resistencia de sistema muerto/fondo: $P_m := P_{smi} \cdot N_{mt} \cdot \mu_{ms}$ $P_m = 34.6 \cdot \text{tonf}$

Factor de seguridad para resistencia de pernada: $FU := \frac{P_m}{T_p}$ $FU = 1.51$ Recomendación OCIMF (2010)

Selección de cadena y fitting

Tension de cadena	$T_c := 1.12 \cdot T_e$	$T_c = 79881.5 \cdot \text{lbf}$	Ref. NAVFAC (1985)
Tensión de rotura cadena	$T_{\text{break}} := \frac{T_c}{0.35}$	$T_{\text{break}} = 228232.9 \cdot \text{lbf}$	Ref. NAVFAC (1985)
Factor de seguridad cadena	FS := 3		Ref. OCIMF(2010)
Tensión máxima cadena	$T_{\text{max}} := T_{\text{break}} \cdot \text{FS}$	$T_{\text{max}} = 684698.8 \cdot \text{lbf}$	
Selección de cadena con malleto para fondeo (carga de rotura)	$T_{\text{cm}} := 705000 \text{lbf}$	$T_{\text{cm}} = 319.8 \text{tonf}$	Ref. "Catálogo Hinrichsen & Sons". Diámetro $\phi 3\text{-}1/16$ pulgadas, cadena Grado 2

Verificación de longitudes de cadena (ecuaciones de catenaria)

Peso de cadena por metro lineal:	$w := \frac{3627 \text{ kgf}}{27.5 \text{ m}}$		Ref. "Catálogo Hinrichsen & Sons" Diámetro $\phi 3\text{-}1/16$ pulgadas, cadena Grado 2
Peso sumergido de cadena por metro lineal:	$w_s := w \cdot \left(\frac{\rho_a - \rho_{\text{am}}}{\rho_a} \right)$	$w_s = 115 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$	
Largo de orinque:	$L_o := (d_m + R_m + H_s) \cdot 115\%$	$L_o = 20.1 \text{ m}$	
Largo efectivo de cadena en catenaria:	$L_c := \sqrt{d_m \cdot \left(\frac{2 \cdot T_p}{w_s} + d_m \right)}$	$L_c = 76 \text{ m}$	(Largo de cadena entre boya hasta touchdown)
Distancia horizontal medida desde boya hasta touchdown:	$X := \left(\frac{T_p}{w_s} - d_m \right) \cdot \ln \frac{\left(L_c + \frac{T_p}{w_s} \right)}{\left(\frac{T_p}{w_s} - d_m \right)}$	$X = 73.4 \text{ m}$	
Largo mínimo de cadena para contrarrestar el tirón:	$L_f := \begin{cases} \frac{T_p - P_m}{w_s \cdot \mu_{\text{CS}}} & \text{if } \frac{T_p - P_m}{w_s \cdot \mu_{\text{CS}}} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	$L_f = 0 \text{ m}$	
Largo total de cadena en línea:	$L_T := L_c + L_f$	$L_T = 2.77 \cdot \text{paños}$	
Largo total de pernada de trabajo:	$L_{\text{pt}} := L_T - L_o$	$L_{\text{pt}} = 2 \cdot \text{paños}$	
Largo de pernada de trabajo a utilizar:	$L_{\text{pt}_u} := 3 \text{paños}$		

Verificación de resistencia con factor de agarre reducido

Fórmula de catenaria: $g(xx) := \frac{-1}{b} \cdot \ln \left[\cos \left[b \cdot \left(xx - \frac{X}{m} \right) \right] \right]$ $b = 5 \times 10^{-3}$

Función de derivada de catenaria: $u(xx) := \frac{d}{dxx} g(xx)$

Ángulo cadena/muerto: $ang := u \left(\frac{L_T}{m} \right) = 0.759^\circ$ (menor que $2^\circ \Rightarrow OK$)

Factor de reducción de coeficiente de agarre: $coef := 0.95$

Fuerza de resistencia de sistema muerto/fondo: $P_{mm} := P_{mi} \cdot N_{mt} \cdot (coef \cdot \mu_{ms})$ $P_m = 55.7 \cdot \text{tonf}$

Factor de seguridad para resistencia de pernada: $FU := \frac{P_m}{T_p}$ $FU = 2.44$ OK

Selección boya de amarre n°1

Fuerza de diseño $P_e = 32.4 \cdot \text{tonf}$

Tensión vertical: $T_{yy} := \frac{P_e}{2 \sin(\theta)}$ $T_{yy} = 22.9 \cdot \text{tonf}$

Puntal del buque: $P := 18\text{m}$ General arrangement nave Valdivia

Calado del buque en carga: $C_b := 13.6\text{m}$ General arrangement nave Valdivia

Distancia vertical agujero espías del buque y la superficie del agua: $v_d := P - C_b = 4.4\text{m}$

Flotabilidad requerida de la boya: $F_b := T_{yy} - \frac{P_e}{\sqrt{\left(\frac{L_{pt_u} + L_o}{v_d} \right)^2 - 1}}$ Ec. 16.1.4 OCDI (2002)

$F_b = 47372.1 \cdot \text{lbf}$

Selección boya de amarre n°1 $B_1 := 50000\text{lbf}$ Tabla 76.NAVFAC (2012)

ii. VERIFICACIÓN BOYA Nº2 (POPA)

Parámetros generales

Peso específico agua de mar:	$\rho_{am} := 1.025 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	
Peso específico de hormigón armado:	$\rho_{ha} := 2.5 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	
Peso específico de acero	$\rho_a := 7.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	
Peso específico de hormigón armado sumergido:	$\rho_{has} := \rho_{ha} - \rho_{am}$	$\rho_{has} = 1.5 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$
Peso específico de acero sumergido:	$\rho_{as} := \rho_a - \rho_{am}$	$\rho_{as} = 6.8 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$
Profundidad en punto de amarre:	$d_m := 13\text{m}$	
Rango máximo de marea:	$R_m := 2\text{m}$	
Altura de ola significativa:	$H_s := 1.5\text{m}$	
Coefficiente de roce muerto/suelo fondo arena:	$\mu_{ms} := 0.69$	Tabla 4.3-2 NAVFAC (2012)
Coefficiente de roce cadena/suelo fondo arena:	$\mu_{cs} := 0.6$	Tabla 4.3-2 NAVFAC (2012)

Fuerzas de diseño

Tensión dirección x:	$T_x := 4.87\text{tonf}$	Sección 5.4.2
Tensión dirección y:	$T_y := 0.5\text{tonf}$	Sección 5.4.2
Tensión en espía:	$T_e := \sqrt{T_x^2 + T_y^2}$	$T_e = 4.9 \cdot \text{tonf}$
Fuerza horizontal de diseño en boya Nº1:	$P_e := T_e$	$P_e = 4.9 \cdot \text{tonf}$
Ángulo entre espía y pernada de trabajo:	$\theta := 45^\circ$	
Fuerza horizontal en pernada de trabajo:	$T_p := \frac{P_e}{2 \cos(\theta)}$	$T_p = 3.5 \cdot \text{tonf}$

Parámetros dimensionales de anclaje de la línea de fondeo

Volumen de muertos de término:	$V_{mi} := 5m^3$	Proceso de iteración
Peso de muertos de término:	$P_{mi} := V_{mi} \cdot \rho_{ha}$	$P_{mi} = 12.5 \cdot \text{tonf}$
Peso sumergido de muertos de término:	$P_{smi} := V_{mi} \cdot \rho_{has}$	$P_{smi} = 7.4 \cdot \text{tonf}$
Cantidad de muertos de término:	$N_{mt} := 1$	

Configuración muerto de término pernada 3 y 4

Base:	$B := 1.63m$		
Altura 1:	$H_1 := 0.30m$		
Altura 2:	$H_2 := 1.35m$		
Ancho:	$A_n := 2m$		
Altura key shear:	$z_s := 0.1 \cdot B$	$z_s = 16.3 \cdot \text{cm}$	NAVFAC(2012)
Numero key shear:	$n := 2$		

Volumen muerto término: $V_{mi} := (0.5 \cdot H_1 \cdot B + B \cdot H_2 + z_s^2 \cdot n) \cdot A_n$ $V_{mi} = 5m^3$ Ok

Configuración muerto retendida

Base:	$B_r := 2m$		
Altura :	$H_r := 1m$		
Ancho:	$A_r := 2.25m$		
Altura key shear:	$z_s := 0.1 \cdot B$	$z_s = 0.32m$	NAVFAC(2012)
Numero key shear:	$n := 2$		

Volumen muerto término: $V_r := B_r \cdot H_r + z_s^2 \cdot n \cdot A_r$ $V_r = 5m^3$ Ok

Verificación de resistencia

Fuerza de resistencia de sistema muerto/fondo: $P_m := P_{smi} \cdot N_{mt} \cdot \mu_{ms}$ $P_m = 5.1 \cdot \text{tonf}$

Factor de seguridad para resistencia de pernada: $FU := \frac{P_m}{T_p}$ $FU = 1.5$ Recomendación OCIMF (2010)

Selección de cadena y fitting

Tension de cadena	$T_c := 1.12 \cdot T_e$	$T_c = 12088.1 \cdot \text{lbf}$	Ref. NAVFAC (1985)
Tensión de rotura cadena	$T_{\text{break}} := \frac{T_c}{0.35}$	$T_{\text{break}} = 34537.4 \cdot \text{lbf}$	Ref. NAVFAC (1985)
Factor de seguridad cadena	FS := 3		Ref. OCIMF(2010)
Tensión máxima cadena	$T_{\text{max}} := T_{\text{break}} \cdot \text{FS}$	$T_{\text{max}} = 103612.3 \cdot \text{lbf}$	
Selección de cadena con mallete para fondeo (carga de rotura)	$T_{\text{cm}} := 105000 \text{lbf}$	$T_{\text{cm}} = 47.6 \cdot \text{tonf}$	Ref. "Catálogo Hinrichsen & Sons". Diámetro $\phi 1\text{-}1/8$ pulgadas, cadena Grado 2

Verificación de longitudes de cadena (ecuaciones de catenaria)

Peso de cadena por metro lineal:	$w := \frac{491 \text{ kgf}}{27.5 \text{ m}}$		Ref. "Catálogo Hinrichsen & Sons" Diámetro $\phi 3\text{-}1/16$ pulgadas, cadena Grado 2
Peso sumergido de cadena por metro lineal:	$w_s := w \cdot \left(\frac{\rho_a - \rho_{\text{am}}}{\rho_a} \right)$	$w_s = 16 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$	
Largo de orinque:	$L_o := (d_m + R_m + H_s) \cdot 115\%$	$L_o = 19 \text{ m}$	
Largo efectivo de cadena en catenaria:	$L_c := \sqrt{d_m \cdot \left(\frac{2 \cdot T_p}{w_s} + d_m \right)}$	$L_c = 77.2 \text{ m}$	(Largo de cadena entre boya hasta touchdown)
Distancia horizontal medida desde boya hasta touchdown:	$X := \left(\frac{T_p}{w_s} - d_m \right) \cdot \ln \left(\frac{L_c + \frac{T_p}{w_s}}{\frac{T_p}{w_s} - d_m} \right)$	$X = 75.1 \text{ m}$	
Largo mínimo de cadena para contrarrestar el tirón:	$L_f := \begin{cases} \frac{T_p - P_m}{w_s \cdot \mu_{\text{CS}}} & \text{if } \frac{T_p - P_m}{w_s \cdot \mu_{\text{CS}}} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	$L_f = 0 \text{ m}$	
Largo total de cadena en línea:	$L_T := L_c + L_f$	$L_T = 2.81 \cdot \text{paños}$	
Largo total de pernada de trabajo:	$L_{\text{pt}} := L_T - L_o$	$L_{\text{pt}} = 2.1 \cdot \text{paños}$	
Largo de pernada de trabajo a utilizar:	$L_{\text{pt}_u} := 3 \text{ paños}$		
Factor de seguridad:	$F_u := \frac{L_{\text{pt}_u} + L_o}{L_T}$	$F_u = 1.31$	se requiere verificación de resistencia con factor de agarre reducido

Verificación de resistencia con factor de agarre reducido

Fórmula de catenaria: $g(x) := \frac{-1}{b} \cdot \ln \left[\cos \left[b \cdot \left(x - \frac{X}{m} \right) \right] \right]$ $b = 4.5 \times 10^{-3}$

Función de derivada de catenaria: $u(x) := \frac{d}{dx} g(x)$

Ángulo cadena/muerto: $\text{ang} := u \left(\frac{L_T}{m} \right) = 0.558^\circ$ (menor que $2^\circ \Rightarrow \text{OK}$)

Factor de reducción de coeficiente de agarre: $\text{coef} := 0.95$

Fuerza de resistencia de sistema muerto/fondo: $P_{\text{mt}} := P_{\text{mi}} \cdot N_{\text{mt}} \cdot (\text{coef} \cdot \mu_{\text{ms}})$ $P_m = 8.2 \cdot \text{tonf}$

Factor de seguridad para resistencia de pernada: $FU := \frac{P_m}{T_p}$ $FU = 2.37$ OK

Selección boya de amarre n°2

Fuerza de diseño $P_e = 4.9 \cdot \text{tonf}$

Tensión vertical: $T_{yy} := \frac{P_e}{2 \sin(\theta)}$ $T_{yy} = 3.5 \cdot \text{tonf}$

Puntal del buque: $P := 18\text{m}$ General arrangement nave Valdivia

Calado del buque en carga: $C_b := 13.6\text{m}$ General arrangement nave Valdivia

Distancia vertical agujero espías del buque y la superficie del agua: $v_d := P - C_b = 4.4\text{m}$

Flotabilidad requerida de la boya: $F_b := T_{yy} \cdot \frac{P_e}{\sqrt{\left(\frac{L_{\text{pt}_u} + L_0}{v_d} \right)^2 - 1}}$ Ec. 16.1.4 OCDE (2002)

$F_b = 7163.3 \cdot \text{lbf}$

Selección boya de amarre n°2 $B_2 := 10000\text{lbf}$ Tabla 76.NAVFAC (2012)

iii. VERIFICACIÓN BOYA Nº3 (ALETA BABOR)

Parámetros generales

Peso específico agua de mar:	$\rho_{am} := 1.025 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	
Peso específico de hormigón armado:	$\rho_{ha} := 2.5 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	
Peso específico de acero	$\rho_a := 7.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	
Peso específico de hormigón armado sumergido:	$\rho_{has} := \rho_{ha} - \rho_{am}$	$\rho_{has} = 1.5 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$
Peso específico de acero sumergido:	$\rho_{as} := \rho_a - \rho_{am}$	$\rho_{as} = 6.8 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$
Profundidad en punto de amarre:	$d_m := 13\text{m}$	
Rango máximo de marea:	$R_m := 2\text{m}$	
Altura de ola significativa:	$H_s := 1.5\text{m}$	
Coefficiente de roce muerto/suelo fondo arena:	$\mu_{ms} := 0.69$	Tabla 4.3-2 NAVFAC (2012)
Coefficiente de roce cadena/suelo fondo arena:	$\mu_{cs} := 0.6$	Tabla 4.3-2 NAVFAC (2012)

Fuerzas de diseño

Tensión dirección x:	$T_x := 18.32\text{tonf}$	Sección 5.4.2
Tensión dirección y:	$T_y := 29.05\text{tonf}$	Sección 5.4.2
Tensión en espía:	$T_e := \sqrt{T_x^2 + T_y^2}$	$T_e = 34.3 \cdot \text{tonf}$
Fuerza horizontal de diseño en boya Nº1:	$P_e := T_e$	$P_e = 34.3 \cdot \text{tonf}$
Ángulo entre espía y pernada de trabajo:	$\theta := 45^\circ$	
Fuerza horizontal en pernada de trabajo:	$T_p := \frac{P_e}{2 \cos(\theta)}$	$T_p = 24.3 \cdot \text{tonf}$

Parámetros dimensionales de anclaje de la línea de fondeo

Volumen de muertos de término:	$V_{mi} := 17.5m^3$	Proceso de iteración
Peso de muertos de término:	$P_{mi} := V_{mi} \cdot \rho_{ha}$	$P_{mi} = 43.8 \cdot \text{tonf}$
Peso sumergido de muertos de término:	$P_{smi} := V_{mi} \cdot \rho_{has}$	$P_{smi} = 25.8 \cdot \text{tonf}$
Cantidad de muertos de término:	$N_{mt} := 2$	

Configuración muerto de término pernada 5 y 6

Base:	$B := 3.3m$		
Altura 1:	$H_1 := 0.7m$		
Altura 2:	$H_2 := 2m$		
Ancho:	$A_n := 2.2m$		
Altura key shear:	$z_s := 0.1 \cdot B$	$z_s = 0.33 m$	NAVFAC(2012)
Numero key shear:	$n := 2$		
Volumen muerto término:	$V_{mi} := (0.5 \cdot H_1 \cdot B + B \cdot H_2 + z_s^2 \cdot n) \cdot A_n$	$V_{mi} = 17.5 m^3$	Ok

Configuración muerto retendida

Base:	$B_r := 3m$		
Altura :	$H_r := 2.2m$		
Ancho:	$A_r := 2.57m$		
Altura key shear:	$z_s := 0.1 \cdot B$	$z_s = 0.32 m$	NAVFAC(2012)
Numero key shear:	$n := 2$		
Volumen muerto término:	$V_r := B_r \cdot H_r + z_s^2 \cdot n \cdot A_r$	$V_r = 17.5 m^3$	Ok

Verificación de resistencia

Fuerza de resistencia de sistema muerto/fondo:	$P_m := P_{smi} \cdot N_{mt} \cdot \mu_{ms}$	$P_m = 35.6 \cdot \text{tonf}$	
Factor de seguridad para resistencia de pernada:	$FU := \frac{P_m}{T_p}$	$FU = 1.5$	Recomendación OCIMF (2010)

Selección de cadena y fitting

Tension de cadena	$T_c := 1.12 \cdot T_e$	$T_c = 84801.9 \cdot \text{lbf}$	Ref. NAVFAC (1985)
Tensión de rotura cadena	$T_{\text{break}} := \frac{T_c}{0.35}$	$T_{\text{break}} = 242291.3 \cdot \text{lbf}$	Ref. NAVFAC (1985)
Factor de seguridad cadena	FS := 3		Ref. OCIMF(2010)
Tensión máxima cadena	$T_{\text{max}} := T_{\text{break}} \cdot \text{FS}$	$T_{\text{max}} = 726873.9 \cdot \text{lbf}$	
Selección de cadena con mallete para fondeo (carga de rotura)	$T_{\text{cm}} := 732000 \text{lbf}$	$T_{\text{cm}} = 332 \cdot \text{tonf}$	Ref. "Catálogo Hinrichsen & Sons". Diámetro ϕ -1/8 pulgadas, cadena Grado 2

Verificación de longitudes de cadena (ecuaciones de catenaria)

Peso de cadena por metro lineal:	$w := \frac{3782 \text{ kgf}}{27.5 \text{ m}}$		Ref. "Catálogo Hinrichsen & Sons" Diámetro ϕ 3-1/16 pulgadas, cadena Grado 2
Peso sumergido de cadena por metro lineal:	$w_s := w \cdot \left(\frac{\rho_a - \rho_{\text{am}}}{\rho_a} \right)$	$w_s = 120 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$	
Largo de orinque:	$L_o := (d_m + R_m + H_s) \cdot 115\%$	$L_o = 19 \text{ m}$	
Largo efectivo de cadena en catenaria:	$L_c := \sqrt{d_m \cdot \left(\frac{2 \cdot T_p}{w_s} + d_m \right)}$	$L_c = 73.8 \text{ m}$	(Largo de cadena entre boya hasta touchdown)
Distancia horizontal medida desde boya hasta touchdown:	$X := \left(\frac{T_p}{w_s} - d_m \right) \cdot \ln \frac{\left(L_c + \frac{T_p}{w_s} \right)}{\left(\frac{T_p}{w_s} - d_m \right)}$	$X = 71.5 \text{ m}$	
Largo mínimo de cadena para contrarrestar el tirón:	$L_f := \begin{cases} \frac{T_p - P_m}{w_s \cdot \mu_{\text{CS}}} & \text{if } \frac{T_p - P_m}{w_s \cdot \mu_{\text{CS}}} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	$L_f = 0 \text{ m}$	
Largo total de cadena en línea:	$L_T := L_c + L_f$	$L_T = 2.68 \cdot \text{paños}$	
Largo total de pernada de trabajo:	$L_{\text{pt}} := L_T - L_o$	$L_{\text{pt}} = 2 \cdot \text{paños}$	
Largo de pernada de trabajo a utilizar:	$L_{\text{pt}_u} := 3 \text{ paños}$		
Factor de seguridad:	$F_u := \frac{L_{\text{pt}_u} + L_o}{L_T}$	$F_u = 1.37$	se requiere verificación de resistencia con factor de agarre reducido

Verificación de resistencia con factor de agarre reducido

Fórmula de catenaria: $g(xx) := \frac{-1}{b} \cdot \ln \left[\cos \left[b \cdot \left(xx - \frac{X}{m} \right) \right] \right]$ $b = 4.9 \times 10^{-3}$

Función de derivada de catenaria: $u(xx) := \frac{d}{dxx} g(xx)$

Ángulo cadena/muerto: $ang := u \left(\frac{L_T}{m} \right) = 0.651 \cdot ^\circ$ (menor que $2^\circ \Rightarrow OK$)

Factor de reducción de coeficiente de agarre: $coef := 0.95$

Fuerza de resistencia de sistema muerto/fondo: $P_{ms} := P_{mi} \cdot N_{mt} \cdot (coef \cdot \mu_{ms})$ $P_m = 57.4 \cdot \text{tonf}$

Factor de seguridad para resistencia de pernada: $FU := \frac{P_m}{T_p}$ $FU = 2.36$ OK

Selección boya de amarre n°3

Fuerza de diseño $P_e = 34.3 \cdot \text{tonf}$

Tensión vertical: $T_{yy} := \frac{P_e}{2 \sin(\theta)}$ $T_{yy} = 24.3 \cdot \text{tonf}$

Puntal del buque: $P := 18\text{m}$ General arrangement nave Valdivia

Calado del buque en carga: $C_b := 13.6\text{m}$ General arrangement nave Valdivia

Distancia vertical agujero espías del buque y la superficie del agua: $v_d := P - C_b = 4.4\text{m}$

Flotabilidad requerida de la boya: $F_b := T_{yy} - \frac{P_e}{\sqrt{\left(\frac{L_{pt_u} + L_o}{v_d} \right)^2 - 1}}$ Ec. 16.1.4 OCDF (2002)

$F_b = 50253.1 \cdot \text{lbf}$

Selección boya de amarre n°3 $B_3 := 50000\text{lbf}$ Tabla 76.NAVFAC (2012)

iv. VERIFICACIÓN ANCLAJE AMURA ESTRIBOR

Parámetros generales:

Peso específico agua de mar:

$$\rho_{am} := 1.025 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Peso específico de acero:

$$\rho_a := 7.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Profundidad media entre punto de amarre y ancla:

$$d_m := 35\text{m}$$

Peso de cadena por metro lineal:

$$w := \frac{3936 \text{ kgf}}{27.5 \text{ m}}$$

Ref. "Catogo Hinrichsen & Sons"
cadena de 81mm de diámetro

Peso específico de cadena por metro lineal:

$$w_s := w \cdot \left(\frac{\rho_a - \rho_{am}}{\rho_a} \right)$$

$$w_s = 124.4 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Tensión en cadena:

$$T_e := \sqrt{(22.1)^2 + (36.06)^2} \text{ tonf}$$

Fuerza horizontal de diseño en cadena:

$$P := T_e$$

$$P = 42.3 \cdot \text{tonf}$$

Coefficiente de roce cadena/suelo

$$\mu_{cs} := 0.6$$

NAVFAC (2012)

Peso de anclas de término tipo Standard Stockless Halls

$$P_a := 11 \text{ tonf}$$

General arragement nave Valdivia

Parámetro dimensional Stockless (fixed fluke)

$$m_o := 11.1$$

Tabla 7.5-1 NAVFAC (2012)

Parámetro dimensional Stockless (fixed fluke)

$$b := 0.8$$

Tabla 7.5-1 NAVFAC (2012)

Capacidad retención ancla

$$H_m := \left[m_o \cdot \left(\frac{P_a}{\text{tonf}} \right)^b \right] \cdot \text{tonf}$$

$$H_m = 75.585 \cdot \text{tonf}$$

NAVFAC (2012)

Verificación de longitudes de cadena (ecuaciones de catenaria)

Largo efectivo de cadena en catenaria:

$$L_c := \sqrt{d_m \cdot \left(\frac{2 \cdot P}{w_s} + d_m \right)}$$

$$L_c = 158.165 \text{ m}$$

Distancia horizontal medida desde boya hasta touchdown:

$$X := \left(\frac{P}{w_s} - d_m \right) \cdot \ln \left(\frac{L_c + \frac{P}{w_s}}{\frac{P}{w_s} - d_m} \right)$$

$$X = 149.626 \text{ m}$$

Largo mínimo de cadena para
para contrarrestar el tirón:

$$L_f := \begin{cases} \frac{P - H_m}{w_s \cdot \mu_{cs}} & \text{if } \frac{P - H_m}{w_s \cdot \mu_{cs}} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad L_f = 0 \text{ m}$$

Largo total de cadena en línea: $L_T := L_c + L_f \quad L_T = 5.75 \cdot \text{paños}$

Largo de cadena a utilizar: $L_{pt_u} := 6 \text{ paños}$

Factor de seguridad
largo cadena: $FU := \frac{L_{pt_u}}{L_c} \quad FU = 1.04$ se requiere verificación de resistencia
con factor de agarre reducido

Verificación de resistencia con factor de agarre reducido

Fórmula de catenaria: $g(xx) := \frac{-1}{b} \cdot \ln \left[\cos \left[b \cdot \left(xx - \frac{X}{m} \right) \right] \right]$
 $b = 2.942 \times 10^{-3}$

Función de derivada de catenaria: $u(xx) := \frac{d}{dxx} g(xx)$

Ángulo cadena/muerto: $\text{ang} := u \left(\frac{L_T}{m} \right) = 1.44^\circ$ (menor que $2^\circ \Rightarrow \text{OK}$)

Factor de seguridad para
resistencia de anclaje: $FU := \frac{H_m}{P} \quad FU = 1.79 \quad \text{OK}$

V. VERIFICACIÓN ANCLAJE AMURA BABOR

Parámetros generales:

Peso específico agua de mar:

$$\rho_{am} := 1.025 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Peso específico de acero:

$$\rho_a := 7.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

Profundidad media entre punto de amarre y ancla:

$$d_m := 35\text{m}$$

Peso de cadena por metro lineal:

$$w := \frac{3936 \text{ kgf}}{27.5 \text{ m}}$$

Ref. "Catogo Hinrichsen & Sons"
cadena de 81mm de diámetro

Peso específico de cadena por metro lineal:

$$w_s := w \cdot \left(\frac{\rho_a - \rho_{am}}{\rho_a} \right)$$

$$w_s = 124.4 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Tensión en cadena:

$$T_e := \sqrt{(22.5)^2 + (32.6)^2} \text{ tonf}$$

Fuerza horizontal de diseño en cadena:

$$P := T_e$$

$$P = 39.6 \cdot \text{tonf}$$

Coefficiente de roce cadena/suelo

$$\mu_{cs} := 0.6$$

NAVFAC (2012)

Peso de anclas de término tipo Standard Stockless Halls

$$P_a := 11 \text{ tonf}$$

General arragement nave Valdivia

Parámetro dimensional Stockless (fixed fluke)

$$m_o := 11.1$$

Tabla 7.5-1 NAVFAC (2012)

Parámetro dimensional Stockless (fixed fluke)

$$b := 0.8$$

Tabla 7.5-1 NAVFAC (2012)

Capacidad retención ancla

$$H_m := \left[m_o \cdot \left(\frac{P_a}{\text{tonf}} \right)^b \right] \cdot \text{tonf}$$

$$H_m = 75.585 \cdot \text{tonf}$$

NAVFAC (2012)

Verificación de longitudes de cadena (ecuaciones de catenaria)

Largo efectivo de cadena en catenaria: $L_c := d_m \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot P}{w_s} + d_m\right)}$ $L_c = 153.32 \text{ m}$

Distancia horizontal medida desde boya hasta touchdown: $X := \left(\frac{P}{w_s} - d_m\right) \cdot \ln \left(\frac{L_c + \frac{P}{w_s}}{\frac{P}{w_s} - d_m}\right)$ $X = 144.39 \text{ m}$

Largo mínimo de cadena para para contrarrestar el tirón: $L_f := \begin{cases} \frac{P - H_m}{w_s \cdot \mu_{cs}} & \text{if } \frac{P - H_m}{w_s \cdot \mu_{cs}} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ $L_f = 0 \text{ m}$

Largo total de cadena en línea: $L_T := L_c + L_f$ $L_T = 5.58 \cdot \text{paños}$

Largo de cadena a utilizar : $L_{pt_u} := 6 \text{ paños}$

Factor de seguridad largo cadena: $FU := \frac{L_{pt_u}}{L_c}$ $FU = 1.1$ se requiere verificación de resistencia con factor de agarre reducido

Verificación de resistencia con factor de agarre reducido

Fórmula de catenaria: $g(xx) := \frac{-1}{b} \cdot \ln \left[\cos \left[b \cdot \left(xx - \frac{X}{m} \right) \right] \right]$ $b = 3.142 \times 10^{-3}$

Función de derivada de catenaria: $u(xx) := \frac{d}{dxx} g(xx)$

Ángulo cadena/muerto: $ang := u\left(\frac{L_T}{m}\right) = 1.608^\circ$ (menor que $2^\circ \Rightarrow \text{OK}$)

Factor de seguridad para resistencia de pernada: $FU := \frac{H_m}{P}$ $FU = 1.91$ OK

ANEXO F. FICHA TÉCNICA DE CAÑERÍAS DE ACERO

Tabla F.1. Propiedades cañerías de acero

Propiedades Cañerías ISO-ASTM

Diámetro Nominal (pulg)	Diámetro Externo (mm)	ISO R65 Ser.Liv.II	ASTMA 795/A53 Sch 10/Gr.B	ASTMA 53 Sch 20/Gr.B	ASTMA 53/106 Sch 40/Gr.B	ASTMA 53 STD/Gr.B	ASTMA 53/106 Sch 80/Gr.B
1/2	21,34	A 2,00 C 700 B 0,950 D 49,2	2,11 0,998		2,77 700 1,266 49,2	2,77 700 1,266 49,2	3,73 850 1,619 59,8
3/4	26,67	2,30 700 1,380 49,2	2,11 700 1,275 49,2		2,87 700 1,683 49,2	2,87 700 1,683 49,2	3,91 850 2,193 59,8
1	33,40	2,60 700 1,980 49,2	2,77 700 2,089 49,2		3,38 700 2,498 49,2	3,38 700 2,498 49,2	4,55 850 3,282 59,8
1 1/4	42,16	2,60 700 2,540 49,2	2,77 1000 2,687 70,3		3,56 1300 3,382 91,4	3,56 1300 3,382 91,4	4,85 1900 4,459 133,6
1 1/2	48,10	2,90 700 3,230 49,2	2,77 1000 3,107 70,3		3,68 1300 4,044 91,4	3,68 1300 4,044 91,4	5,08 1900 5,403 133,6
2	60,32	2,90 700 4,080 49,2	2,77 1000 3,925 70,3		3,91 2500 5,436 175,8	3,91 2500 5,436 175,8	5,54 2500 7,473 175,8
2 1/2	73,02	3,20 700 5,710 49,2	3,05 1000 5,254 70,3		5,16 2500 8,620 175,8	5,16 2500 8,620 175,8	7,01 2500 11,400 175,8
3	88,90	3,20 700 6,720 49,2	3,05 1000 6,446 70,3		5,49 2500 11,278 175,8	5,49 2500 11,278 175,8	7,62 2500 15,252 175,8
4	114,30	3,60 700 9,750 49,2	3,05 1200 8,352 84,4		6,02 2210 16,055 155,4	6,02 2210 16,055 155,4	8,56 2800 22,290 196,9
5	141,30		3,40 1200 11,582 84,4		6,55 1950 27,754 137,1	6,55 1950 27,754 137,1	9,52 2800 30,921 196,9
6	168,27		3,40 1000 13,622 70,3	6,35 1190 25,340 83,7	7,11 1780 28,227 125,2	7,11 1780 28,227 125,2	10,97 2740 45,512 192,7
8	219,07		4,78 800 19,939 56,3	6,35 1220 33,272 85,8	8,18 1570 42,482 110,4	8,18 1570 42,482 110,4	12,70 2430 64,584 170,9
10	273,05		4,78 700 27,825 49,2	6,35 980 41,723 68,9	9,27 1430 60,234 100,6	9,27 1430 60,234 100,6	15,06 2320 95,723 163,2
12	323,85		4,57 36,009	6,35 820 49,669 57,7	10,31 1340 79,653 94,2	9,52 1240 73,745 87,2	17,45 1940 131,703 136,4
14	355,60		6,35 54,624	7,92 940 67,972 66,1	11,10 1310 94,204 92,1	9,52 1120 81,247 78,8	19,05 2250 157,877 158,2
16	406,40		6,35 62,570	7,92 820 77,912 57,7	12,70 1310 123,162 92,1	9,52 980 93,119 68,9	21,41 2220 203,112 156,1
18	457,20		6,35 70,516	7,92 730 87,837 51,3	14,27 1310 155,942 92,1	9,52 880 105,038 61,9	23,80 2190 254,150 154,0
20	508,00		6,35 70,516	9,52 790 116,957 55,6	15,06 1250 182,875 87,9	9,52 790 117,02 55,6	26,19 2170 310,843 152,6

(*) Cañerías ISO 1/2" tienen exterior de 76.1 mm. Nota: Cada celda de datos contiene 4 datos. Donde:

A	C
B	D

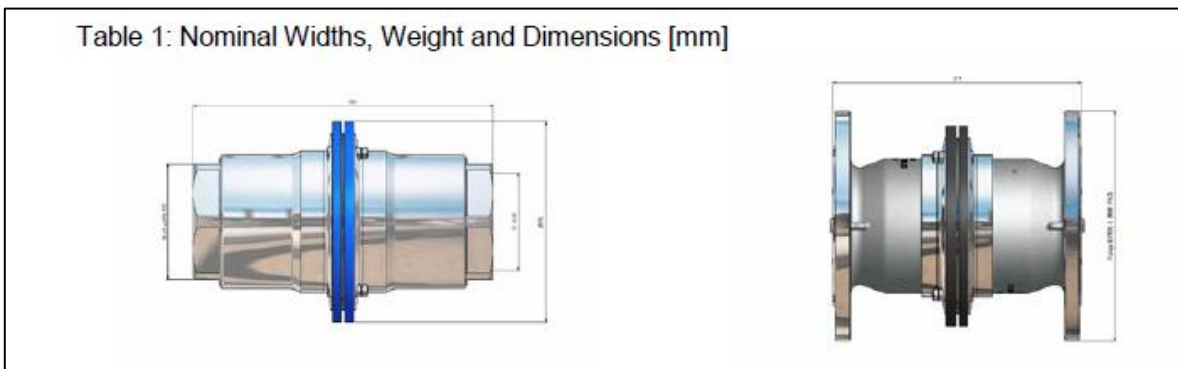
A: Espesor de Cañerías expresado en milímetros (mm) C: Presión de trabajo (de prueba) expresada en PSI (lb/pulg.2)
 B: Peso por metro de cañería expresada en kg/m D: Presión de trabajo (de prueba) expresada en kg/cm²

FUENTE: CATÁLOGO DE PRODUCTOS MULTIACEROS

ANEXO G. FICHA TÉCNICA VÁLVULA BREAK AWAY

Tabla G.1. Tensión de rotura válvula break away




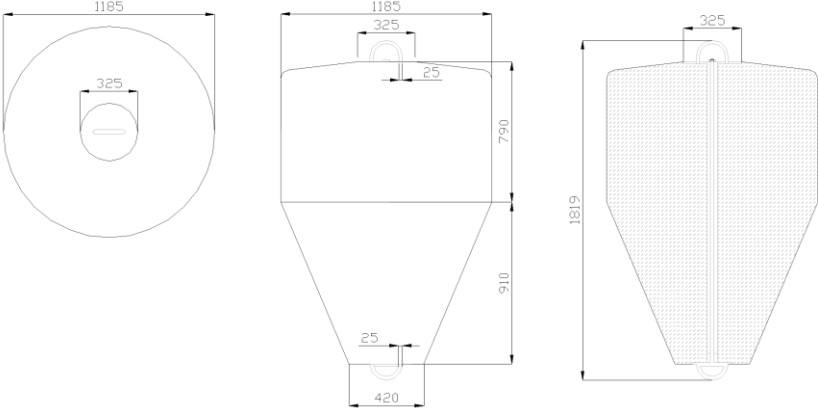
Nominal width	Breaking force	Connection	kg (stainless)	D [mm]	L [mm]
2½"	22 kN	2½" Thread	7	140	251
		2½" Flange	13	190	214
3"	33 kN	3" Thread	9	175	279
		3" Flange	15	210	222
4"	52 kN	4" Thread	16	210	320
		4" Flange	21	255	239
5"	81 kN	5" NPT male	29	270	362
		5" Flange	38	280	341
6"	92 kN	6" Thread	47	305	400
		6" Flange	58	320	384
8"	165 kN	8" Flange	78	380	428
10"	151 kN	10" Flange	125	445	527
12"	217 kN	12" Flange	185	520	560



FUENTE: SBC OPERATING MANUAL 2½" – 12" MANNTEK

ANEXO H. FICHA TÉCNICA BOYARÍN DE LEVANTE

Figura H.1. Ficha técnica boyarín de levante

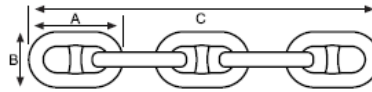
<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Volumen Exterior 1500 Lts • Cáncamos metálicos superior e inferior Ø25 mm • Cubierta exterior polietileno HDPE rotomodelado • Espesor cubierta 9mm (promedio) • Componentes metálicos galvanizados en caliente • Fabricada en Polietileno MAD • Inyectada en Poliestireno expandido de 18 Kg/m³ • Cubierta exterior estanca, aditivo Anti-Uv 	<p>VOLUMEN 1100 LTS</p> <p>MEDIDAS</p> <p>Diámetro Central : 1.350 mm</p> <p>Alto : 1.664 mm</p> <p>Peso Total : 87 kg</p>	
		
		

FUENTE: MARCA POYCHEM

ANEXO I. FICHA TÉCNICA CADENAS PARA FONDEO CON MALLETE

Tabla I.1. Ficha técnica cadenas para fondeo

Características técnicas y resistencia

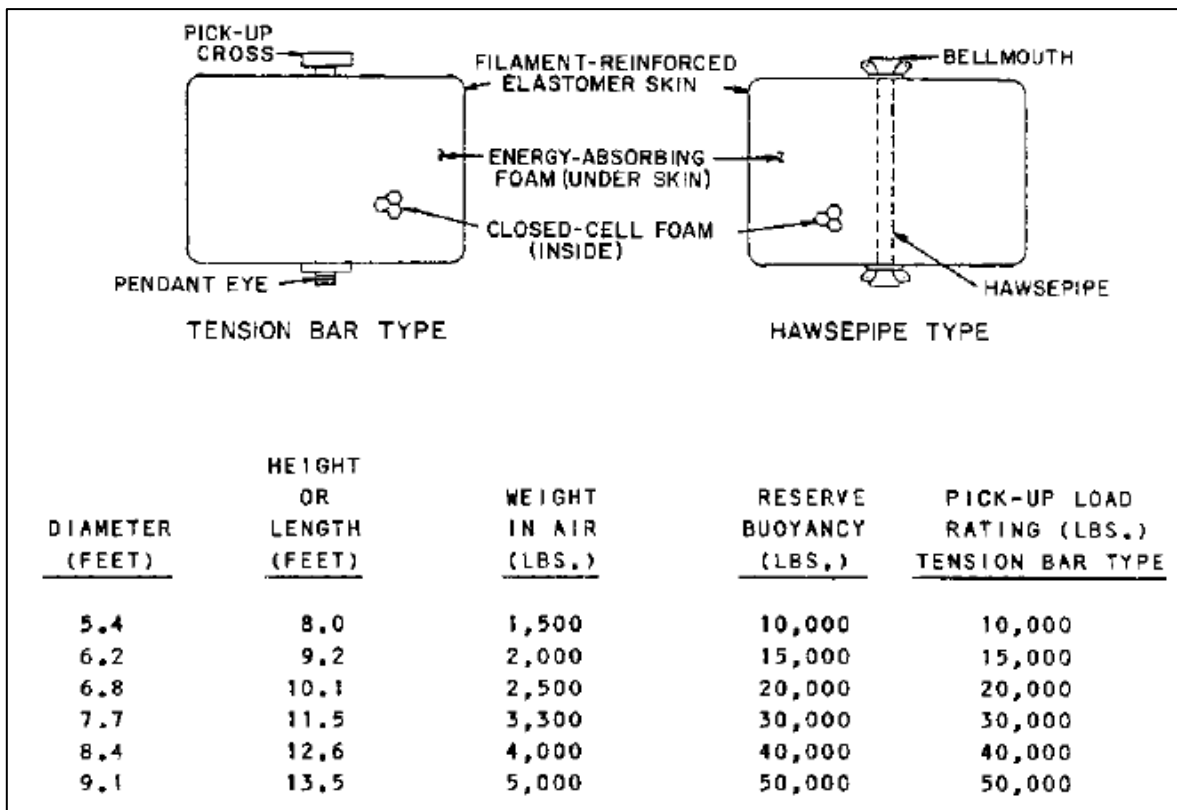


Diámetro Cadena	Dimensiones Plg	Capacidad de la Cadena						Peso por pie de 27.5 m	Nº de Eslabones por pie					
		Grado 1		Grado 2		Grado 3				Calidad Oil Rig				
plg	mm	Largo Eslabón A	Ancho Eslabón B	Largo en 5 Eslabones C	Carga de Prueba	Carga de Ruptura	Carga de Prueba	Carga de Ruptura	Carga de Prueba	Carga de Ruptura	Carga de Prueba	Carga de Ruptura	kg	
5/8	16	3-3/4	2-1/4	13-3/4	16620	23745	33220	33220	33220	47465			166	432
3/4	19	4-1/2	2-5/8	16-1/2	23800	34000	34000	47600	47600	68000			218	367
13/16	20	4-7/8	2-7/8	17-7/8	27800	39800	39800	55700	55700	79500			259	329
7/8	22	5-1/4	3-1/8	19-1/4	32200	46000	46000	64400	64400	91800			300	306
15/16	24	5-5/8	3-5/16	20-5/8	36800	52600	52600	73700	73700	105000			345	285
1	25	6	3-9/16	22	41800	59700	59700	83600	83600	119500	84000	129000	391	267
1-1/16	27	6-3/8	3-3/4	23-3/8	47000	67200	67200	94100	94100	135000			441	251
1-1/8	28	6-3/4	4	24-3/4	52600	75000	75000	105000	105000	150000	106000	161000	491	237
1-13/16	30	7-1/8	4-1/4	26-1/8	58400	83400	83400	116500	116500	167000			555	225
1-1/4	32	7-1/2	4-1/2	27-1/2	64900	92200	92200	129000	129000	184000	130000	198000	614	213
1-5/16	33	7-7/8	4-3/4	28-7/8	70900	101500	101500	142000	142000	203000			677	203
1-3/8	34	8-1/4	4-15/16	30-1/4	77500	111000	111000	155000	155000	222000	157000	235000	741	195
1-7/16	36	8-5/8	5-3/16	31-5/8	84900	120500	120500	169000	169000	241000			809	187
1-1/2	38	9	5-3/8	33	91700	131000	131000	183500	183500	262000	185000	280000	882	179
1-9/16	40	9-3/8	5-5/8	34-3/8	99200	142000	142000	198500	198500	284000			960	171
1-5/8	42	9-3/4	5-7/8	35-3/4	108000	153000	153000	214000	214000	306000	216000	325000	1018	165
1-11/16	43	10-1/8	6-1/16	37-1/8	115000	166500	166500	229000	229000	327000			1095	159
1-3/4	44	10-1/2	6-5/16	38-1/2	123500	176000	176000	247000	247000	352000	249000	380000	1177	153
1-13/16	45	10-7/8	6-1/2	39-7/8	132000	188500	188500	264000	264000	377000			1268	147
1-7/8	48	11-1/4	6-3/4	41-1/4	140500	201000	201000	281000	281000	402000	285000	432000	1355	143
1-15/16	50	11-5/8	7	42-5/8	149500	214000	214000	299000	299000	427000			1445	139
2	51	12	7-3/16	44	159000	227000	227000	318000	318000	454000	322000	488000	1527	133
2-1/16	52	12-3/8	7-7/16	45-3/8	168500	241000	241000	337000	337000	482000	342000	518000	1623	129
2-1/8	54	12-3/4	7-5/8	46-3/4	178500	255000	255000	357000	357000	510000	362000	548000	1723	125
2-3/16	56	13-1/8	7-7/8	48-1/8	188500	269000	269000	377000	377000	538000	382599	579100	1827	123
2-1/4	58	13-1/2	8-1/8	49-1/2	198500	284000	284000	396000	396000	570000	403000	610000	1932	119
2-5/16	59	13-7/8	8-5/16	50-7/8	209000	299000	299000	418000	418000	598000	425000	642500	2041	117
2-3/8	60	14-1/4	8-9/16	52-1/4	212000	314000	314000	440000	440000	628000	447000	675000	2150	113
2-7/16	62	14-5/8	8-3/4	53-5/8	231000	330000	330000	462000	462000	660000	469500	709500	2255	111
2-1/2	64	15	9	55	242000	346000	346000	484000	484000	692000	492000	744000	2395	107
2-9/16	66	15-3/8	9-1/4	56-3/8	254000	363000	363000	507000	507000	726000	516000	778500	2518	105
2-5/8	67	15-3/4	9-7/16	57-3/4	265000	379000	379000	530000	530000	758000	540000	813000	2645	103
2-11/16	68	16-1/8	9-11/16	59-1/8	277000	396000	396000	554000	554000	792000	565000	849000	2777	99
2-3/4	70	16-1/2	9-7/8	60-1/2	289000	413000	413000	578000	578000	826000	590000	885000	2914	97
2-13/16	71	16-7/8	10-1/8	61-7/8	301000	431000	431000	603000	603000	861000	615000	925000	3050	95
2-7/8	73	17-1/4	10-3/8	63-1/4	314000	449000	449000	628000	628000	897000	640000	965000	3191	93
2-15/16	75	17-5/8	10-9/16	64-5/8	327000	467000	467000	654000	654000	934000	665000	1005000	3332	91
3	76	18	10-13/16	66	340000	485000	485000	679000	679000	970000	693000	1045000	3477	89
3-1/16	78	18-3/8	11	67-3/8	353000	504000	504000	705000	705000	1008000	720500	1086500	3627	87
3-1/8	79	18-3/4	11-1/4	69-3/4	366000	523000	523000	732000	732000	1046000	748000	1129000	3782	85
3-3/16	81	19-1/8	11-1/2	70-1/8	380000	542000	542000	759000	759000	1084000	776050	1169000	3936	85
3-1/4	83	19-1/2	11-11/16	71-1/2	393000	562000	562000	787000	787000	1124000	804100	1210000	4095	83
3-5/16	84	19-7/8	11-15/16	72-7/8	407000	582000	582000	814000	814000	1163000	833150	1253000	4255	81
3-3/8	86	20-1/4	12-1/8	74-1/4	421000	602000	602000	843000	843000	1204000	862200	1296000	4423	79
3-7/16	87	20-5/8	12-3/8	75-5/8	435000	622000	622000	871000	871000	1244000	892100	1339500	4591	77
3-1/2	90	21	12-5/8	77	450000	643000	643000	900000	900000	1285000	922000	1383100	4773	77
3-5/8	92	21-3/4	12-15/16	79-3/4	479000	685000	685000	958000	958000	1299000	1021000	1566000	5136	73
3-3/4	95	22-1/2	13-3/8	82-1/2	509000	728000	728000	1019000	1019000	1455000	1120000	1750000	5455	71
3-7/8	98	23-1/4	14	85-1/4	540000	772000	772000	1080000	1080000	1543000	1205000	1863000	5864	69
4	102	24	14-3/8	88	571000	816000	816000	1143000	1143000	1573200	1298000	1996500	6227	67

FUENTE: HINRICHEN & SONG

ANEXO J. FICHA TÉCNICA BOYA DE AMARRE

Figura J.1. Hawsepipe and Tension Bar Mooring Buoy



FUENTE: NAVFAC (1986)

ANEXO K. BOYAS DE AMARRE Y PERNADAS DE TRABAJO

Tabla K.1. Listado general de elementos Boya N°1 (Aleta estribor)

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD
A	BOYA DE AMARRE	1
B	GRILLETE CON PASADOR REDONDO Ø3-1/16" ; GRADO 2	1
C	PERNADA GIRATORIA Ø3-1/16"; GRADO 2	1
D	ESLABON DE UNION KENTER Ø3-1/16"; GRADO 2	8
E	TRAMO CADENA Ø3-1/16" CON MALLETE, LONG= 20M; GRADO 2	1
F	1 PAÑO CADENA Ø3-1/16" CON MALLETE Y ESLABONES DE TERMINO ALARGADOS, LONG= 27.5M; GRADO 2	6.5
G	GRILLETE TIPO "D" Ø3-1/16"; GRADO 2	7
H	ARGOLLÓN DE DISTRIBUCIÓN Ø3"; GRADO 2	1
I	MUERTO DE TÉRMINO RETENIDA	1
J	MUERTO DE TÉRMINO PERNADA TRABAJO	4
K	GRILLETE TIPO "D" Ø3-1/16"; GRADO 2	4
L	TRAMO CADENA Ø3-1/16" CON MALLETE, LONG= 4M; GRADO 2	2

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tabla K.2. Listado general de elementos Boya N°2 (Popa)

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD
A	BOYA DE AMARRE	1
B	GRILLETE CON PASADOR REDONDO Ø3-1/16"; GRADO 2	1
C	PERNADA GIRATORIA Ø1-1/8"; GRADO 2	1
D	ESLABON DE UNION KENTER Ø1-1/8"; GRADO 2	8
E	TRAMO CADENA Ø1-1/8" CON MALLETE, LONG= 19M; GRADO 2	1
F	1 PAÑO CADENA Ø1-1/8" CON MALLETE Y ESLABONES DE TERMINO ALARGADOS, LONG= 27.5M; GRADO 2	6.5
G	GRILLETE TIPO "D" Ø1-1/8"; GRADO 2	7
H	ARGOLLÓN DE DISTRIBUCIÓN Ø1-8"; GRADO 2	1
I	MUERTO DE TÉRMINO RETENIDA	1
J	MUERTO DE TÉRMINO PERNADA TRABAJO	2

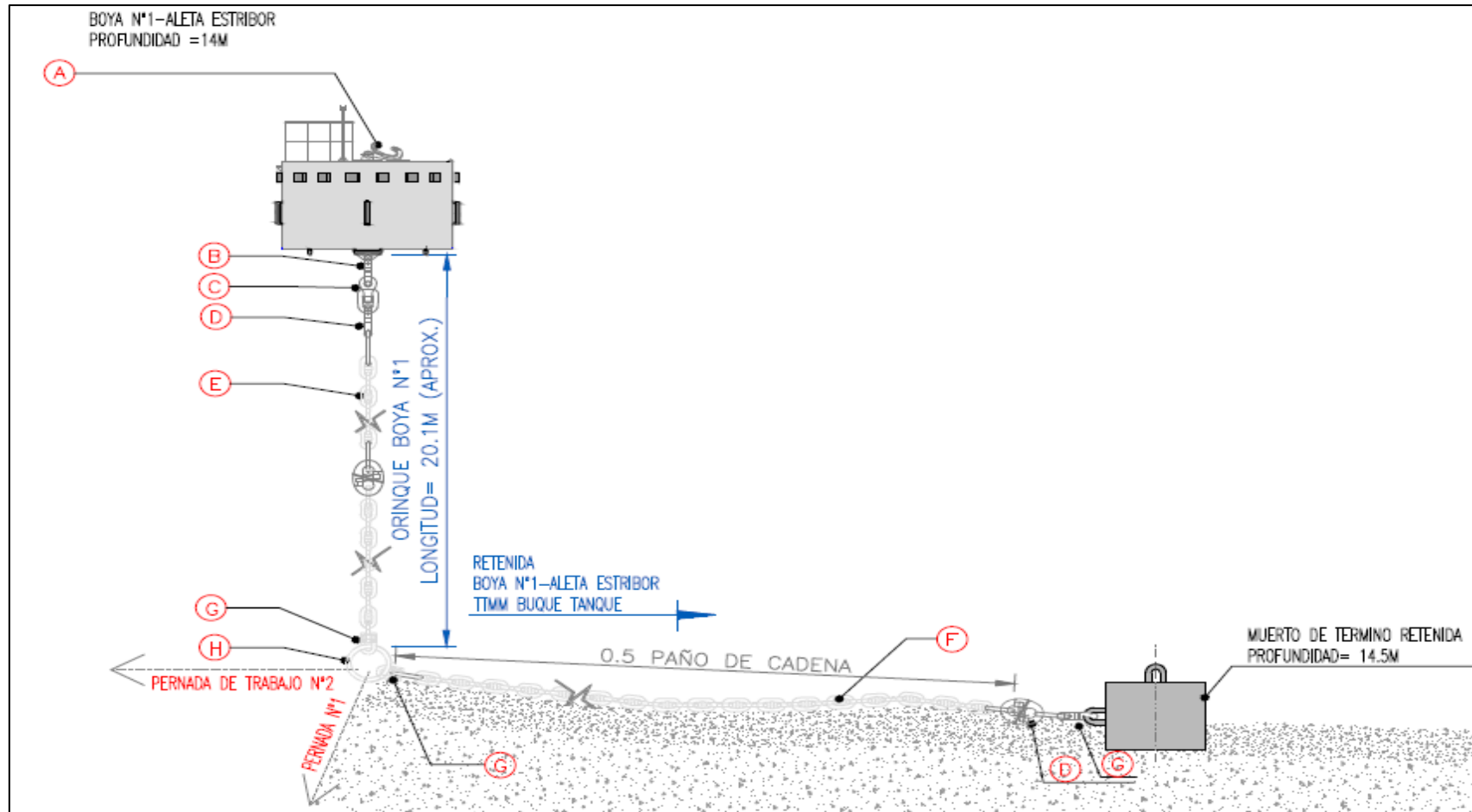
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tabla K.3. Listado general de elementos Boya N°3 (Aleta babor)

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD
A	BOYA DE AMARRE	1
B	GRILLETE CON PASADOR REDONDO Ø3-1/8"; GRADO 2	1
C	PERNADA GIRATORIA Ø3-1/8"; GRADO 2	1
D	ESLABON DE UNION KENTER Ø3-1/8"; GRADO 2	8
E	TRAMO CADENA Ø3-1/8" CON MALLETE, LONG= 19M; GRADO 2	1
F	1 PAÑO CADENA Ø3-1/8" CON MALLETE Y ESLABONES DE TERMINO ALARGADOS, LONG= 27.5M; GRADO 2	6.5
G	GRILLETE TIPO "D" Ø3-1/8"; GRADO 2	7
H	ARGOLLÓN DE DISTRIBUCIÓN Ø3-1/8"; GRADO 2	1
I	MUERTO DE TÉRMINO RETENIDA	1
J	MUERTO DE TÉRMINO PERNADA TRABAJO	4
K	GRILLETE TIPO "D" Ø3-1/8"; GRADO 2	4
L	TRAMO CADENA Ø3-1/8" CON MALLETE, LONG= 4M; GRADO 2	2

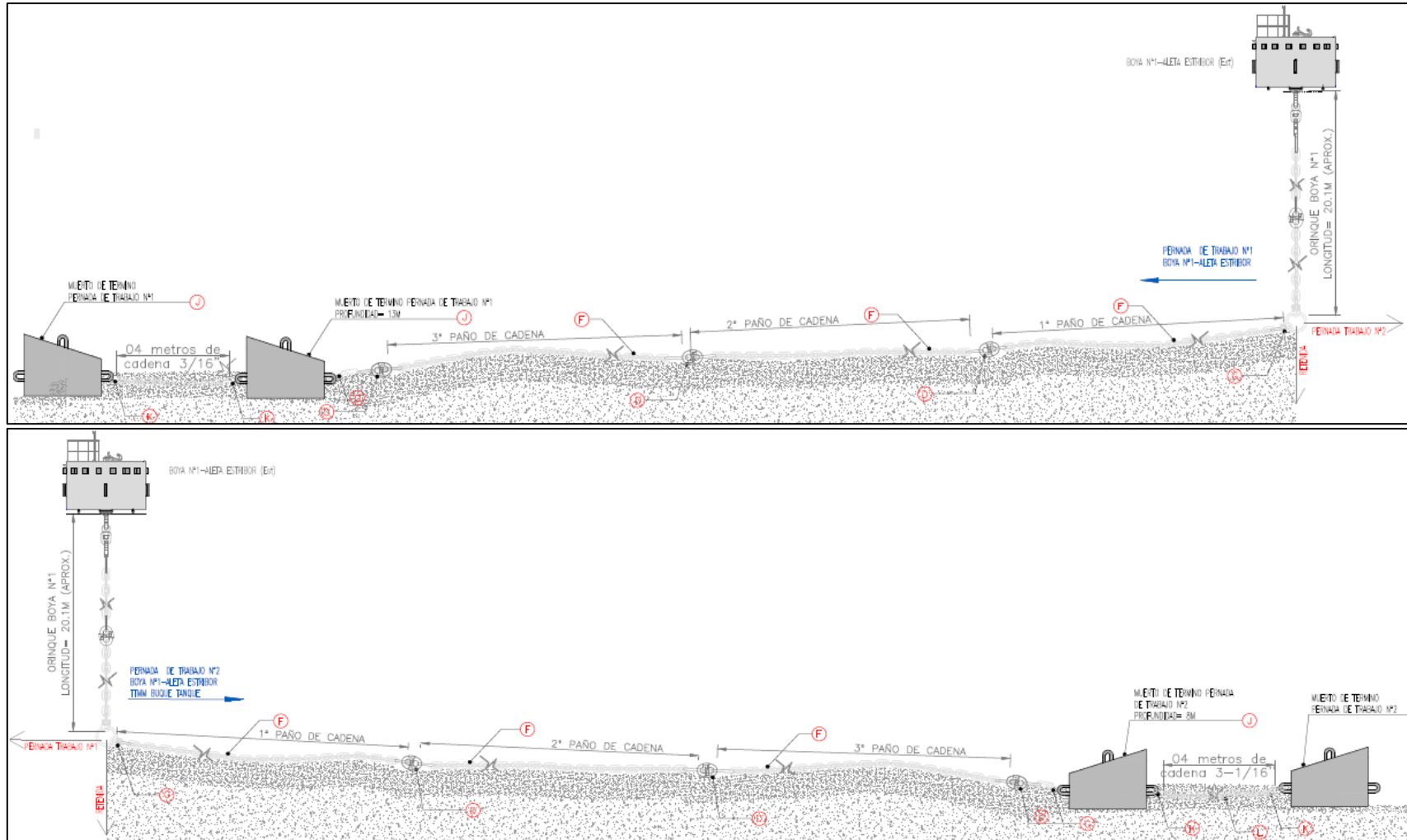
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura K.1. Boya N°1 con retenida



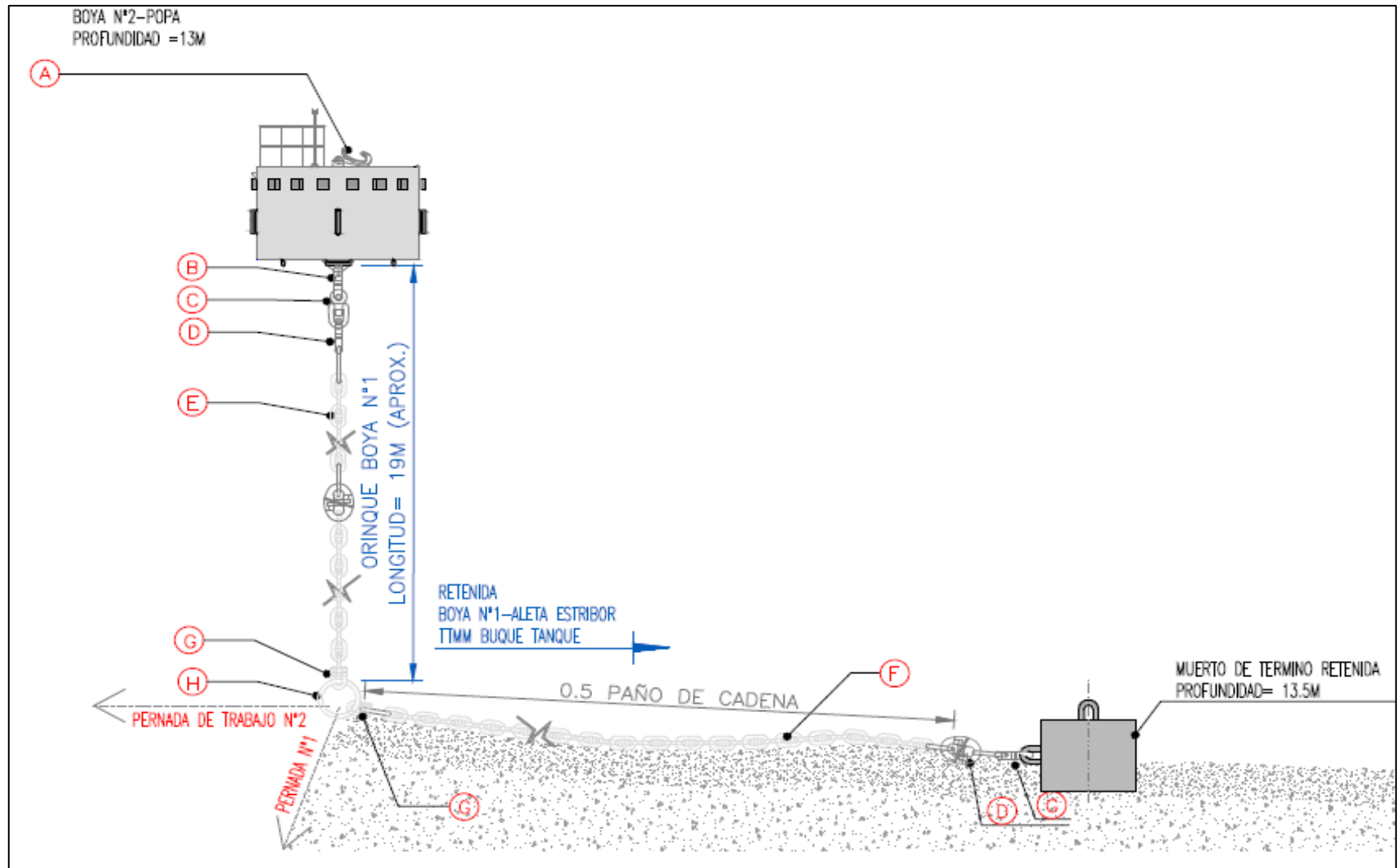
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura K.2. Boya N°1 – pernada 1 y pernada 2



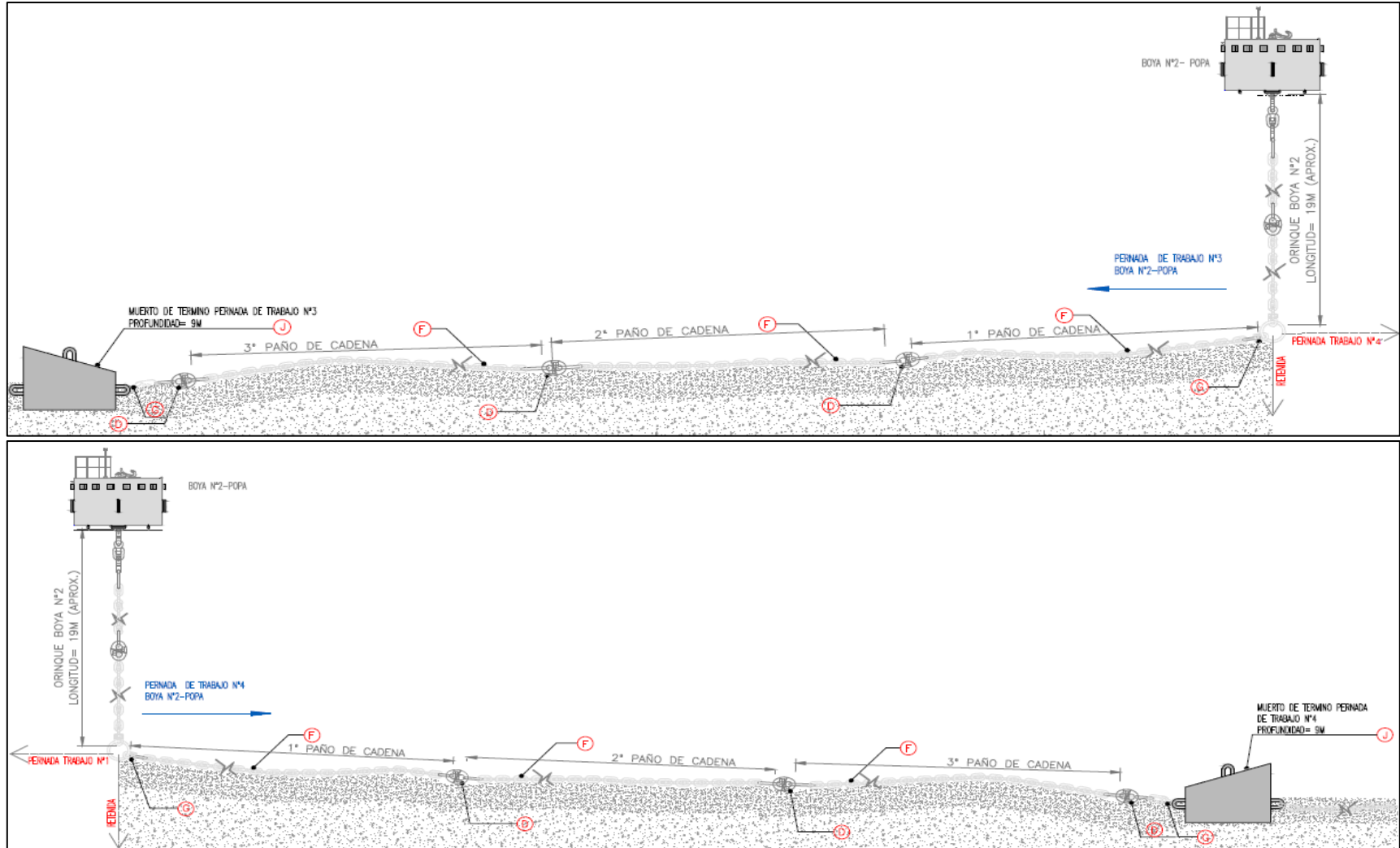
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura K.3.Boya N°2 con retenida



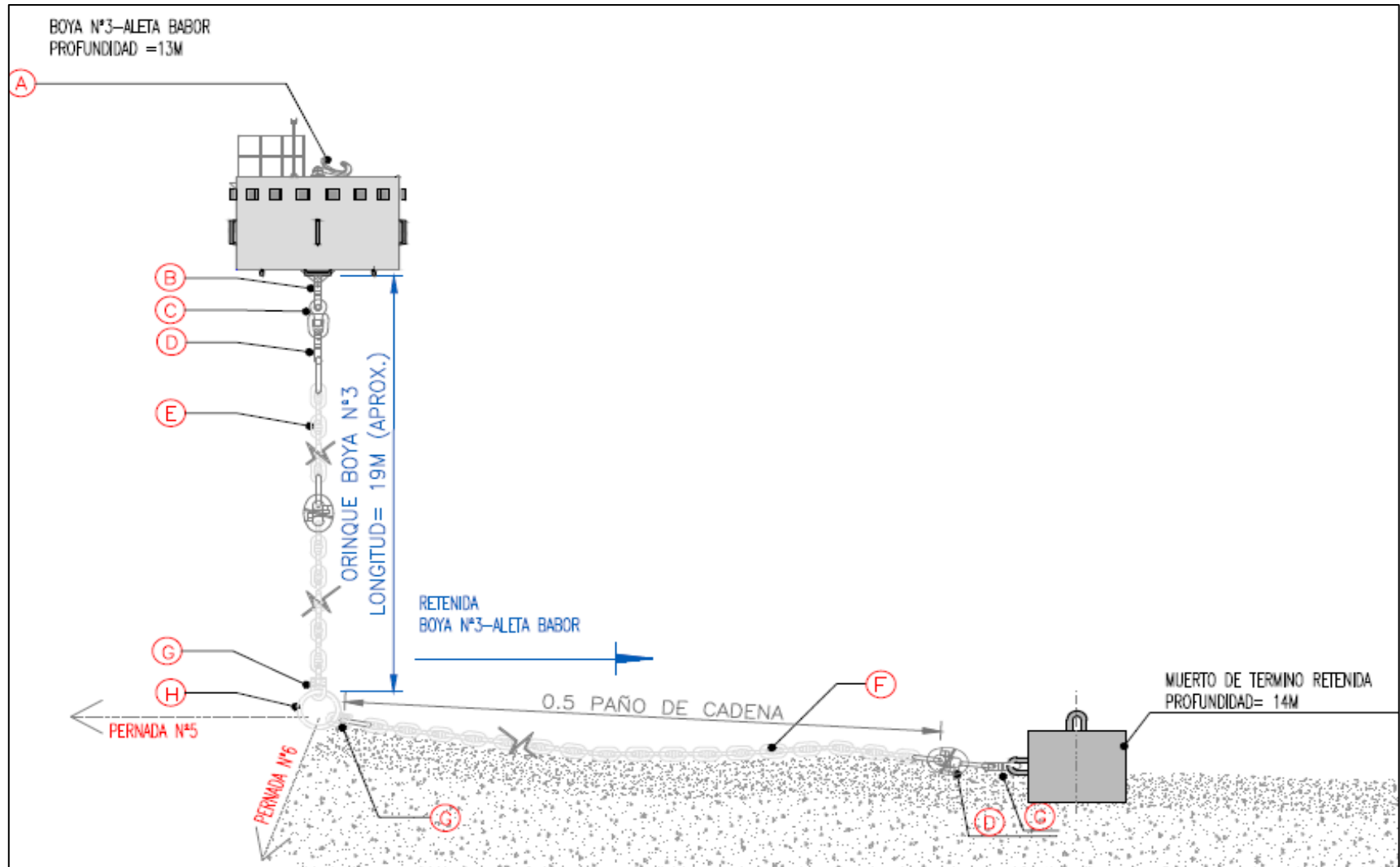
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura K.4.Boya N°2 – pernada 3 y pernada 4



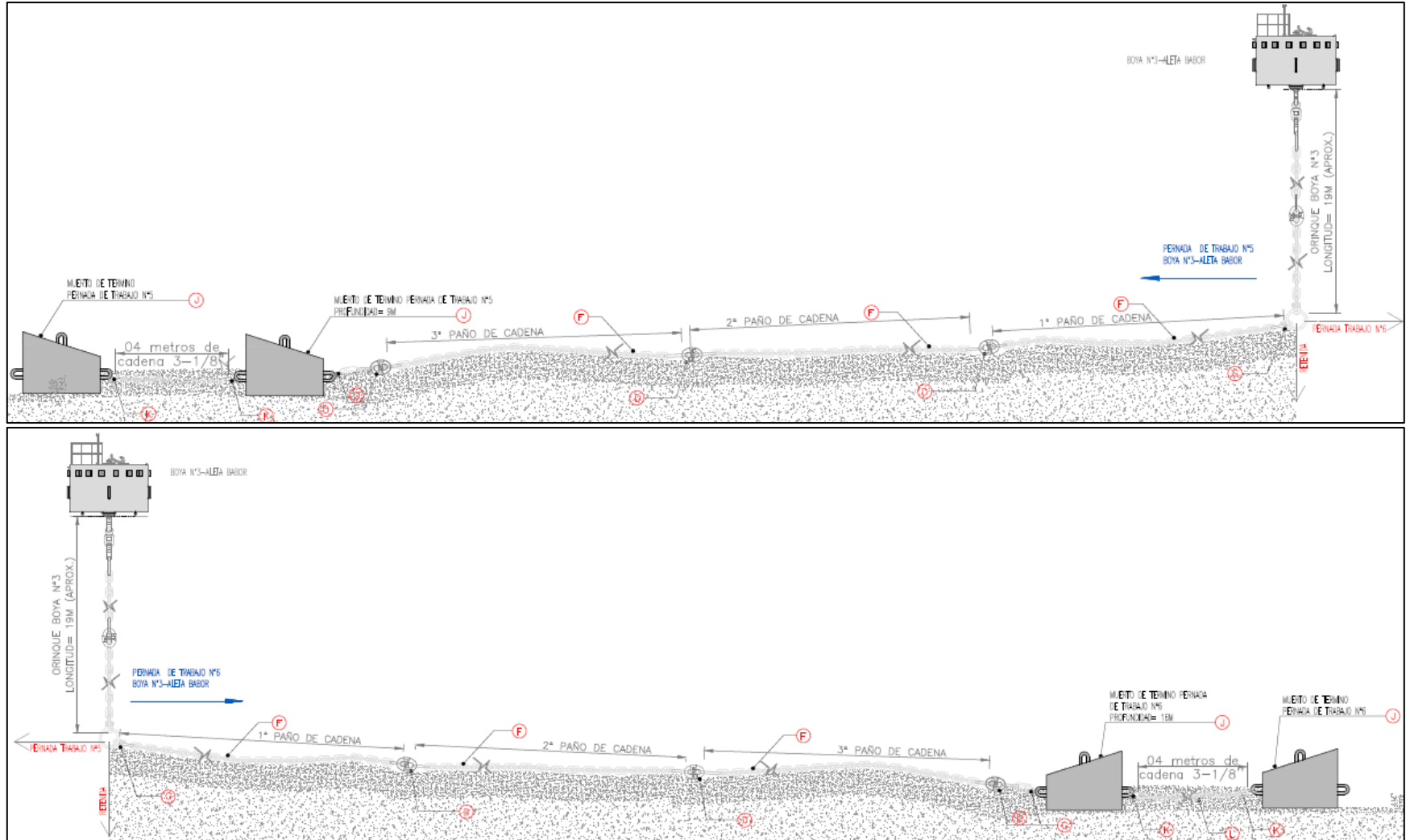
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura K.5.Boya N°3 con retenida



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Figura K.6.Boya N°2 – pernada 5 y pernada 6



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

ANEXO L. DIMENSIONAMIENTO MUERTOS DE FIJACIÓN PARA CAÑERÍAS SUBMARINAS

Parámetros de entrada

Diámetro externo cañería	$D_{\text{ext}} := 14\text{in}$
Ángulos según figura:	$\alpha := 70^\circ$
Recubrimiento externo:	$\text{rec} := 6\text{mm}$
Peso específico H.A:	$\rho := 2.5\text{tonf}\cdot\text{m}^{-3}$
Peso específico Agua de mar:	$\rho_{\text{SW}} := 1.025\text{tonf}\cdot\text{m}^{-3}$

Dimensiones según Figura 5.33

$A := D_{\text{ext}} + \text{rec}\cdot 2 + 5\text{cm}$	$A = 41.8\cdot\text{cm}$
$B := A$	$B = 41.8\cdot\text{cm}$
$C := A$	$C = 41.8\cdot\text{cm}$
$E := B + 0.5\cdot A + D_{\text{ext}}$	$E = 98.2\cdot\text{cm}$
$D := 2\cdot\left(C - \frac{E}{\tan(\alpha)}\right) + A$	$D = 53.8\cdot\text{cm}$
$F := D\cdot 1.2$	$F = 64.6\cdot\text{cm}$
$G := F + 2\frac{E}{\tan(\beta)}$	$G = 136\cdot\text{cm}$
$H := 2C + A$	$H = 125.3\cdot\text{cm}$

Cálculo volúmen y peso muerto tronco-piramidal

Volumen tronco-piramidal: $V_t := \frac{E}{3}\cdot(H\cdot G + F\cdot D + \sqrt{H\cdot G\cdot F\cdot D}) = 0.92\cdot\text{m}^3$

Centroide semi-circunferencia: $Y_{\text{cg}} := \frac{4\cdot A}{6\pi} = 8.9\cdot\text{cm}$

Largo promedio cañería a lo largo del muerto: $L_{\text{prom}} := \frac{G - 2\frac{(B + Y_{\text{cg}})}{\tan(\beta)} + G - 2\frac{\left(B + Y_{\text{cg}} + \frac{A}{2} - Y_{\text{cg}}\right)}{\tan(\beta)}}{2} = 94.8\cdot\text{cm}$

Volumen semi-
circunferencia:

$$V_c := \frac{\pi \cdot A^2}{8} \cdot L_{\text{prom}} = 0.06 \cdot \text{m}^3$$

Volumen interior :

$$V_{\text{int}} := B \cdot A \cdot \left(G - \frac{2 \cdot B}{\tan(\beta)} \right) + V_c = 0.25 \cdot \text{m}^3$$

Volumen muerto tronco
piramidal:

$$V_{\text{muerto}} := V_t - V_{\text{int}}$$

$$V_{\text{muerto}} = 0.67 \text{ m}^3$$

Peso seco muerto tronco
piramidal:

$$W_m := V_{\text{muerto}} \cdot \rho$$

$$W_m = 1.7 \text{ tonf}$$

Peso sumergido muerto:

$$W_{\text{sum}} := V_{\text{muerto}} \cdot (\rho - \rho_{\text{sw}})$$

$$W_{\text{sum}} = 1 \text{ tonf}$$

ANEXO M. TERMINALES MARÍTIMOS PETROLEROS EN CHILE

	Nombre y propietario Terminal	Características buque tanque		Elementos de amarre	Productos a transferir	Sistema de transferencia de carga
		Eslora máxima [m]	Calado máximo [m]			
Arica	Terminal Petrolero Comap, Copec	185	13	3 boyas a popa	Petróleo diesel, gasolina 93, gasolina 97	2 cañerías rígidas de 12"
	Terminal Sica Sica, Yacimientos Petrolíferos Bolivia	180	11.43	3 boyas a popa, 2 anclas a proa	Petróleo crudo, diesel oil	1 cañería rígida de 10" rígida y flexible de 12"
Iquique	Terminal Petrolero Petrobras	184	12.39	3 boyas a popa	Diesel, gas 93, gas 97, kerosene, F.O. N°6	
	Terminal Copec	229	12.8	3 boyas a popa	Diesel, gas 93, gas 97, kerosene, F.O. N°6	
Tocopilla	Muelle Electroandina	250	14.1	3 boyas a popa, 2 boyas a proa	Soda cáustica, petróleo diesel, fuel Oil N°6	Ducto aéreo para descarga de combustibles
Mejillones	Terminal Marítimo Interacid	183 - 220	10.75 - 14	4 duques de alba, 3 postes de amarra	Ácido sulfúrico, Petróleo limpio	1 ducto aéreo de 12" para hidrocarburos, 1 ducto aéreo de 8" para ácido sulfúrico
	Terminal Marítimo Vopak-Oxiquim	200	13.5	3 boyas	Subproductos químicos y petróleo	3 cañerías submarinas de 6" de diámetro
	Terminal Marítimo Terquim S.A.	240	12.8	1 boya	Subproductos químicos y petróleo	10 cañerías aéreas
Antofagasta	Terminal Enx	191.5	15	3 boyas a popa	Combustibles y lubricantes	2 cañerías rígidas, de 10" y 8" y flexibles
Chañaral	Terminal petrolero Petrobras, Codelco	250	14		Fuel oil, diesel	
Caldera	Terminal Marítimo Rocas Negras Copec	200	11.9	2 boyas a popa	Petróleo limpio- Gasolina	7 cañerías submarinas
Husaco	Guacolda I, Empresa Eléctrica Guacolda S.A	240	13.5		IFO 180, diesel	
	Guacolda II, Cía. Minera del Pacífico S.A	315	20.6	2 bitas, 7 boyas, 2 dolphins	IFO 360, diesel	
Isla de Pascua	Terminal Marítimo petrolero Vinapu ENAP	160	10.5	2 rejeras	Kerosen, petróleo y combustible de aviación	Ductos submarinos rígidos y flexibles
Coquimbo	Terminal Marítimo Comap Guayacan	190	11.4	2 boyas a popa	Petróleo limpio	1 cañería submarina de 12"
Quintero	Terminal Marítimo Multicrudo ENAP	250	12.9	3 boyas a popa, 2 rejeras	Combustibles livianos, gasolina, petróleo diesel, kerosene, combustibles pesados	4 cañerías submarinas
	Terminal Petrolero Monoboya SBM ENAP	345	Sin restricción	Monoboya	Petróleo crudo	Línea submarina y flexibles
	Terminal El Bato Copec	250	12.5	3 boyas a popa, 2 rejeras	Petróleo y subproductos limpios	3 cañerías submarinas rígidas y flexibles
San Vicente	Terminal Petrolero norte ENAP	250	12.8	6 postes de amarre, 4 duques de alba	Petróleo crudo limpio	6 Ductos NR, instalados sobre la pasarela.
	Terminal Petrolero sur ENAP	200	10.8	4 postes de amarre, 4 duques de alba	Petróleo crudo, productos petroleros limpios y GLP	
	Muelle mecanizado Abastible	190	12.1	3 duques de alba, 4 postes de amarre, 5 boyas	Productos de petróleo limpio y GLP	6 ductos aéreos por medio de flexibles
Coronel	Terminal Marítimo Oxiquim (Escuadrón)	211	12.2	2 boyas a popa y 2 boyarines de rejera a proa	Petróleo y subproductos limpios, químicos	3 cañerías submarinas rígidas y flexibles
Chacabuco	Terminal Petrolero Copec	119.8	8	1 boya a proa y 2 bitas de onilla a proa	Petróleo limpio	1 cañería submarinas y flexible
Calbuco	Muelle mecanizado, Portuaria Cabo Froward S.A.	228	12	4 dolphins, bitas de amarre, 5 boyas	Graneles sólidos, aceite de pescado o vegetal, combustible	1 ducto aéreo para aceite de pescado, ducto aéreo para combustible
Punta Arenas	Terminal Marítimo Cabo Negro Muelle N°1 ENAP	241	14	6 duques de alba y 4 postes de amarre	Crudo, productos de petróleo limpio, GLP, metanol	2 ductos
	Terminal Marítimo Cabo Negro Muelle N°2 ENAP	241	14	6 duques de alba y 6 postes de amarre	Crudo, productos de petróleo limpio, GLP, metanol	1 ducto
Punta Delgada	Terminal Marítimo Gregorio ENAP	250	14.9	3 boyas, 3 rejeras	Petróleo crudo, petróleo reducido, kerosene, diesel	3 cañerías submarinas rígidas y flexibles

ANEXO N. VERIFICACIÓN ESTABILIDAD DE CAÑERÍAS SUBMARINAS

Coeficiente de roce cañería/fondo	$\mu := 0.6$	NAVFAC (2012)
Factor de seguridad	$\gamma := 1.1$	Yong Bai (2001)
Largo de la cañería	$L_c := 487\text{m}$	Tabla 5.20
Peso sumergido cañería por metro lineal	$P_T := 0.06 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$	Sección 5.5.3.2
Peso sumergido muertos de fijación tronco-piramidal	$P_L := 1\text{tonf}$	Sección 5.5.3.2
Peso sumergido muertos de término	$P_{LT} := 8.49\text{tonf}$	Sección 5.5.3.4
Número muertos de fijación tronco-piramidal	$N_{pl} := 40$	Sección 5.5.3.5
Número muertos de término	$N_{pt} := 4$	Sección 5.5.3.4
Fuerza de arrástre máxima	$F_{am} := 0.0524 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$	Tabla 5.24
Fuerza de inercia máxima	$F_{im} := 0.0107 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$	Tabla 5.24
Fuerza de lift máxima	$F_{lm} := 0.013 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$	Tabla 5.24
Peso total de cañería submarina y muertos de fijación	$W_t := P_T \cdot L_c + P_L \cdot N_{pl} + P_{LT} \cdot N_{pt}$	$W_t = 103.18 \text{ tonf}$

$$\text{Verificación} := \begin{cases} \text{"Cumple estabilidad"} & \text{if } \mu > \frac{\gamma \cdot (F_{am} - F_{im}) \cdot L_c}{(W_t - F_{lm} \cdot L_c)} \\ \text{"La cañería no es estable"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Yong Bai (2001,pág.3)}$$

Verificación = "Cumple estabilidad"

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Babor: Parte izquierda de la embarcación mirando de popa a proa.

Boyas de amarre: Son cilindros o tambores giratorios, anclados al lecho marino, al que se unen las líneas de amarre. La boya de amarre puede servir sólo como un flotador con la cadena del ancla que pasa a través de la boya directamente al gancho de amarre, en cuyo caso ninguna de las cargas de tensión se transfiere a la boya (OCIMF, 2010, pág. xiii).

Boya cilíndrica: Son grandes latas cilíndricas que se encuentran horizontalmente en el agua. La mayoría de las boyas cilíndricas en servicio tienen un diámetro de 1,5 a 2,5 metros y una altura de 3,0 a 4,5 metros. Un elemento estructural se extiende a través del centro de la boya. Un gancho de amarre está unido a un extremo del miembro estructural y la cadena de anclaje está unida al otro extremo.

Boyarín: Flotador que se utiliza para demarcar la posición de algún elemento de termino como cañerías submarinas o anclas de buques.

Cáncamo: Pieza o cabilla de hierro en forma de armella, que sirve para enganchar cabos, cadenas, etc.

Clave de una cañería: Parte superior de una cañería.

Dirección a la cuadra: Llega perpendicular al buque. Dirección perpendicular a la quilla o al rumbo que se hace.

Desplazamiento: Peso del volumen de agua desalojado por el buque en una determinada flotación.

Desplazamiento en lastre: Peso de un buque incluyendo pertrechos, provisiones, tripulación, combustible y agua. No lleva carga pero si e mínimo peso de lastre para que el buque pueda navegar y maniobrar con seguridad.

Desplazamiento en rosca: Peso total de un buque según sale del astillero, sin pertrechos, provisiones, tripulación, combustible y agua. En estas condiciones el buque no puede navegar.

Desplazamiento máximo: Peso total del buque cuando está cargado a la máxima carga permitida.

Espía: Cada una de las cuerdas o tirantes con que se mantiene fijo un madero.

Estribor: Es la parte derecha de la embarcación mirando de popa a proa.

Fondear: Es la maniobra de fijar el barco mediante el ancla.

Gancho de amarre: Dispositivo que conecta una línea de amarre con la boya de amarre

Garrear ancla: Arrastre de un ancla por el fondo del mar cuando no se ha hecho firme en el terreno.

Grillete: Arco de hierro semicircular, con sus extremos unidos por un perno, para asegurar una cadena al pie de un presidiario, a un punto de una embarcación, etc.

Manifold: Parte del sistema de tuberías de cargue, descargue o manejo de productos, en el cual confluyen varios tubos y válvulas, por lo que también se le conoce como "múltiple de cargue".

Orinque: Cabo que une y sujeta una boya a un ancla fondeada o muerto.

Pernadas de trabajo: Paños de cadena que unen el ancla o muerto con un argollón de distribución.

Peso muerto (Dead Weight): Peso total que puede transportar un buque en toneladas métricas, incluyendo peso cargamento, combustible, agua y provisiones en general.

Recubrimiento/Revestimiento: Material que se aplica sobre la superficie de un metal para aislarlo del medio ambiente o del electrolito.

Rejera: Calabrote, cabo, boya o ancla con el que se intenta mantener fija o en posición conveniente una embarcación.

Trash zone: El área donde la sección de cadena debajo de las boyas de amarre está en constante contacto con el movimiento e intermitentemente con el fondo marino.

Touch-down: El punto de contacto de amarre de cadena con el fondo marino entre la boya de amarre y el punto de anclaje.

UKC: La distancia entre el fondo de la embarcación, en su punto más profundo de inmersión, y el fondo marino o cualquier objeto que descansa sobre el fondo marino, tales como tuberías submarinas y colectores, grupos de hormigón, escombros, etc.

Válvula break away: Válvula que intercalada en una línea de flexibles, se separa en dos partes cuando la línea es sometida a esfuerzos de tracción o sobrepresión, cerrándose automáticamente ambas partes y sellando cada extremo de la línea.

BIBLIOGRAFÍA

- Agostini, C., & Saavedra, E. (2009). *La Industria del Petróleo en Chile*.
- Almazán et.al, J. (2000). *Instalaciones off-shore para carga y descarga de hidrocarburos. Mono boyas y campos de boyas*.
- API. (2000). (American Petroleum Institute). *Recommended Practice for Planning , Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design*. API Recommended Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD). Twenty-First Edition, December 2000. Provided by IHS under license with API.
- API. (2003). *Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents*. API Recommended practice 1111 . (2015). *Desing, Construction, Operation, And Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)*.
- ASME B31.4. (2016). *Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*.
- Autoridad Marítima Portuaria. (2010). *Glosario de Términos Marítimos Portuarios*. Gerencia de Regulación Marítima y Portuaria. El Salvador.
- Bai, Y. (2001). *Pipe lines and risers*. Elsevier Ocean Engineering Book Series (Vol. 3).
- Beyá, J., Álvarez , M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., . . . Molina, M. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición*. Valparaíso, Chile, (Vol. Primera edición). Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- Bluewater. (2018). *Sistema de amarre convencional de boya*. Obtenida el 18 de abril de 2018.
- British Standard. (1991). Civil Engineering and Building Structures Standards Policy Committee.
- BS 6349-6. (1999). *British Standard Maritime structures - Part 6: Design of inshore moorings and floating structures*.
- CEM. (2008). (Coastal Engineering Manual). US Army Corps of Engineers. CEM. No. EM 1110-2-1100.
- CEM VI-5 pt3. (2006). *The Coastal Engineering Manual*.
- CNE. (2017). *Comisión Nacional de Energía. Anuario estadístico de energía*.
- Decreto 160. (2009). *Reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de combustibles líquidos*.
- Decreto 9. (2018). *Sustituye reglamento sobre concesiones marítimas, fijado por decreto supremo (M) N°2, de 2005 del ministerio de defensa nacional*.
- Directemar. (2018). *Boletín Estadístico Marítimo*. Dirección General del territorio Marítimo y de Marina Mercante.
- DOP. (2013). *Guía para el diseño, construcción ,operación y conservación de obras marítimas y costeras*.
- FCMC. (2012). *El explorador eólico 2012*. Facultad de ciencias físicas y matemáticas Universidad de Chile.
- Gaza-Rios, L., Bernitsas, M., & Nishimoto, K. (1997). *Catenary mooring lines with not linear drag and touchdown*.
- Municipalidad de Coronel. (s.f). Obtenido de Recuperado de <http://www.ecoronel.cl/atlas-ambiental-de-coronel/contexto-ambiental-de-coronel/>
- Municipalidad de Coronel. (s.f). Obtenido de Recuperado de <http://www.ecoronel.cl/atlas-ambiental-de-coronel/medio-construido/infraestructuras/infraestructura-portuaria/>

- NAVFAC. (1985). *Fleet Moorings. Basic Criteria and Planning Guidelines* (Vol. 26.5). Alexandria Virginia.
- NAVFAC. (1986). *Mooring Design Physical & Empirical Data. Vessel & Ship Characteristics, Mooring Lines & Chain Buoys, Anchors & Riser Type Mooring Systems*.
- NAVFAC. (2012). *Handbook for Marine Geotechnical Engineering*.
- OCDI. (2002). *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*. The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan.
- OCIMF. (2010). *Guidelines for the Design, Operation and Maintenance of Multi Buoy Moorings*.
- OWET. (2009). *Advanced Anchoring and Mooring Study*. Oregon Wave Energy Trust.
- Oxiquim S.A. (2003). *Estudio de Maniobrabilidad Terminal Marítimo Oxiquim*.
- PIANC. (1995). *Criteria for movements of moored ships in harbours*.
- PIANC. (1995). *Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours. A Practical Guide*.
- PRDW. (2008). *Muelle de descarga de carbón. Bahía de coronel región del Bio-Bio*.
- PRDW-AV. (2008). *Muelle de descarga de carbón Puerto de Coronel*.
- PRWD. (2005). *Abastible S.A. Terminal Marítimo San Vicente VIII Región. Proyecto dragado sitio norte*.
- PRWD. (2008). *Muelle de descarga de carbón. Bahía de Coronel*.
- Puerto de Coronel. (2008). *Ingeniería conceptual, básica y de detalle del Muelle de descarga de carbón*. Concepción.
- Puertos del Estado. (2005). *ROM 0.5-05 (Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias)*.
- ROM 2.0-11. (2012). *Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre (Tomo I)*.
- ROM. (2012). *Recomendaciones de Obras Marítimas. Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre*.
- ROM 3.1-99. (2000). *Proyecto de la configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación*.
- Thorensen, C. A. (2003). *Port designer's handbook: Recommendations and guidelines*.
- Thorensen, C. A. (2003). *Port Designer's Handbook: Recommendations and Guidelines*. Academic & Technical, Bristol.
- Villa, R. (2015). *Sistemas de amarre en buques: Situación actual y futura. Tesis doctoral*.