



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS NATURALES

**DETERMINACIÓN DE LA OPERABILIDAD DE UN BUQUE
AMARRADO PARA EL FUTURO TERMINAL DE DESCARGA DE
CARBÓN EN MEJILLONES, II REGIÓN.**

PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

CARLOS DANIEL CÓRDOVA VÁSQUEZ

PROFESOR GUÍA:
MAURICIO REYES GALLARDO

COMISIÓN EVALUADORA:
PATRICIO WINCKLER GREZ
ERNESTO GÓMEZ ARAYA

VIÑA DEL MAR – CHILE
MAYO 2010

DECLARACIÓN

Este trabajo o alguna de sus partes no ha sido presentado 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 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 propósitos de obtención de Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a sus derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

La base de datos de los estudios oceanográficos son de propiedad de la empresa PROCON S.A. Ingeniería utilizada en el contexto de esta memoria, ha sido cedida a la Universidad de Valparaíso para fines académicos exclusivos de este proyecto de título. El uso comercial de esta información por parte de terceros será de su responsabilidad y devengará eventualmente en el cobro de los derechos correspondientes.

AGRADECIMIENTOS

En estos párrafos quiero agradecer personalmente a tres personas fundamentales que han sido un pilar fundamental en el desarrollo de mi Proyecto de Título: a Don José Garrido Cuadra, Don Mauricio Reyes Gallardo y Don Matías Quezada Labra, por tener la paciencia y gentileza en aclarar dudas y problemas presentados en el desarrollo de este proyecto. Además a los profesores de la carrera de Ingeniería Civil Oceánica, en especial a Don Patricio Winckler Grez por su entrega en todo momento en el mundo de la ingeniería marítima en Chile, y los amigos de PROCON S.A. Ingeniería que siempre estuvieron ayudándome con sus comentarios y arreglos correspondientes con respecto a la memoria.

También van mis agradecimientos a mis padres y mi hermano Sebastián Córdova Vásquez con su apoyo incondicional en todo momento.

Finalmente nada más que agradecer a todas las personas que siempre me estuvieron apoyando en esté largo proceso que es el Proyecto de Título.

Carlos Córdova Vásquez.

Este Proyecto de Título va dedicado a mi abuelo Newman Vásquez Martí, a pesar de no estar presente en estos momentos sé que desde el cielo está compartiendo este esfuerzo.

Hay hombres que luchan un día y son buenos.

Hay otros que luchan un año y son mejores.

Hay quienes luchan muchos años y son muy buenos.

Pero hay los que luchan toda la vida: esos son los imprescindibles.

Bertolt Brecht.....

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	13
2	ALCANCES	14
3	OBJETIVOS	15
3.1	Objetivo General	15
3.2	Objetivos Específicos	15
4	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	16
4.1	Mecánica del Oleaje.....	16
4.1.1	Oleaje Regular.....	16
4.2	Teoría Lineal del Oleaje	17
4.2.1	Enfoque de Análisis	17
4.2.2	Conservación de Masa “Ecuación de Continuidad”	18
4.2.3	Ecuaciones de Movimiento.....	19
4.2.4	Ecuaciones de Movimiento para Fluidos Irrotacionales.....	21
4.2.5	Formulación de Teoría Lineal del Oleaje	22
4.2.6	Condiciones de Borde.....	23
4.3	Análisis de Oleaje.....	26
4.3.1	Descripción Estadística del Oleaje.....	26
4.3.2	Descripción Espectral del Oleaje	27
4.4	Sintéticas de Oleaje	29
4.4.1	Espectro Pierson – Moskowitz.....	29
4.4.2	Espectro Jonswap.....	30
4.4.3	Espectro Swell	31
4.5	Teoría de Cuerpos Flotantes.....	31
4.5.1	Fuerzas de Olas Regulares	32
4.5.2	Fuerza de Olas Irregulares	33
4.5.3	Fuerza Media de Deriva por Oleaje	33
4.5.4	Dominio de Frecuencia	34
4.5.5	Fuerzas y Momentos	36
4.5.6	Cargas Hidrodinámicas.....	37

4.6	Determinación de las Fuerzas Sobre la Nave	39
4.6.1	Fuerzas del Viento	39
4.6.2	Fuerzas de las Corrientes	40
5	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	41
5.1	Ubicación del Terminal Marítimo	41
5.2	Condiciones Climáticas	43
5.3	Condiciones Oceanográficas	43
5.3.1	Estudio de Vientos	43
5.3.2	Estudio de Olas	48
5.3.3	Estudio de Corrientes	51
5.3.4	Estudio de Mareas	64
6	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA TERMSIM II	65
6.1	Generalidades	65
6.2	Descripción de la Base de Datos	68
7	LIMITACIONES DEL BUQUE	70
8	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A MODELAR	71
8.1	Muelle Granelero	71
8.2	Naves de Diseño	72
8.3	Condición de Carga	73
8.3.1	Desplazamiento a Plena Carga	73
8.4	Deckhouse (Superestructura)	75
8.5	Determinación Área Expuesta	76
8.6	Coeficientes Hidrodinámicos	77
8.7	Sistema de Amarre	78
8.7.1	Fairleads	78
8.7.2	Bitas	79
8.7.3	Líneas de Amarre	80
8.8	Sistema de Atraque	82
8.8.1	Características Fuerzas de Atraque	82

8.8.2	Determinación de la Energía Efectiva de Atraque	83
8.8.3	Determinación de la Energía Cinética de Atraque (E).....	84
8.8.4	Determinación de la Energía Efectiva de Atraque (E_f)	84
8.8.5	Selección de la Defensa	85
8.8.6	Energía de Absorción de la Defensa (E_a) y Reacción (R)	86
9	EJECUCIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO TERMSIM II	88
9.1	Casos de Estudio	88
9.2	Ensayos Efectuados.....	90
9.3	Criterios para Estimación de la Operabilidad	90
9.3.1	Criterios de Downtime.....	90
9.3.2	Criterios Limitantes del Buque	91
9.3.3	Tensión Admisible en las Espías de Amarre	91
9.3.4	Carga Admisible en las Defensas	91
9.4	Porcentaje de Operabilidad Obtenido	91
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94

ANEXOS

ANEXO A PLANOS TERMINAL MARÍTIMO DE MEJILLONES

ANEXO B TABLAS CON RESULTADOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA TERMSIM II

LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1: Condiciones Climáticas de Mejillones [Fuente: Referencia 14].	43
Tabla 5-2: Incidencia del Viento Magnitud vs Dirección “Invierno” [Fuente: Referencia 9].	46
Tabla 5-3: Valores Medio y Máximo del Viento por Dirección “Invierno” [Fuente: Referencia 9].	46
Tabla 5-4: Incidencia del Viento Magnitud vs Dirección “Verano” [Fuente: Referencia 9].	47
Tabla 5-5: Valores Medio y Máximo del Viento por Dirección “Verano” [Fuente: Referencia 9].	48
Tabla 5-6: Ubicación del Nodo de Extracción de Datos de Olas [Fuente: Referencia 8].	49
Tabla 5-7: Incidencia de Alturas de Olas (H_s) por Período (T_p) [Fuente: Referencia 8].	50
Tabla 5-8: Incidencia de Alturas de Olas (H_s) por Dirección (D) [Fuente: Referencia 8].	50
Tabla 5-9: Coordenadas Geográficas de las Mediciones de Corrientes [Fuente: Referencia 10].	51
Tabla 5-10: Campaña de Invierno Julio – Agosto [Fuente: Referencia 10].	58
Tabla 5-11: Campaña de Verano Enero - Febrero 2008 [Fuente: Referencia 10].	60
Tabla 5-12: Incidencia de las Corrientes en el Fondo Marino “Invierno” [Referencia 10].	62
Tabla 5-13: Incidencia de las Corrientes en el Fondo Marino “Verano” [Fuente: Referencia 10].	64
Tabla 5-14: Características de la Marea en Mejillones [Fuente: Referencia 11].	65
Tabla 7-1: Movimiento Admisible Nave Granelera [Fuente: Referencia 6].	70
Tabla 8-1: Características Nave Granelera LOA 280 [Fuente: Referencia 12].	72
Tabla 8-2: Características Nave Granelera LOA 180 [Fuente: Referencia 12].	72
Tabla 8-3: Coeficientes de Bloque Navas Graneleras [Fuente: Referencia 3].	74
Tabla 8-4: Volumen Máximo y Mínimo Nave Granelera [Fuente: Referencia 3].	75
Tabla 8-5: Superestructura Nave Granelera [Fuente: Referencia 1].	76
Tabla 8-6: Área Expuesta de la Nave al Viento LOA 280 m [Fuente: Referencia 3].	77
Tabla 8-7: Área Expuesta de la Nave al Viento LOA 180 m [Fuente: Referencia 3].	77
Tabla 8-8: Coordenadas de las Bitas [Fuente: Referencia 15].	79
Tabla 8-9: Características Técnicas de Amarras [Fuente: Referencia 1].	81
Tabla 8-10: Energía y Reacción de la Cell Fender [Fuente: Referencia 1].	87
Tabla 9-1: Casos de Estudio Buque Granelero LOA 280 – LOA 180 [Fuente: Referencia 12].	89
Tabla 9-2: Movimientos Admisibles Nave Granelera [Fuente: Referencia 6].	91
Tabla 9-3: Porcentaje de Operabilidad – Buque Granelero C Máx. LOA 280 m [Fuente: Referencia 15].	92
Tabla 9-4: Porcentaje de Operabilidad – Buque Granelero C Mín. LOA 280 m [Fuente: Referencia 15].	92
Tabla 9-5: Porcentaje de Operabilidad – Buque Granelero C Máx. LOA 180 m [Fuente: Referencia 15].	93
Tabla 9-6: Porcentaje de Operabilidad – Buque Granelero C Mín. LOA 180 m [Fuente: Referencia 15].	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 4-1: Volumen de Control [Fuente: Referencia 2].	18
Figura 5-1: Foto Satelital de la Zona del Proyecto [Fuente: Referencia 13].	42
Figura 5-2: Ubicación del Terminal Marítimo de Mejillones [Fuente: Referencia 13].	42
Figura 5-3: Estación Meteorológica Vantage Pro 2 [Fuente: Referencia 9].	44
Figura 5-4: Frecuencia Dirección y Magnitud del Viento " Invierno" [Fuente: Referencia 9].	45
Figura 5-5: Frecuencia Dirección y Magnitud del Viento "Verano" [Fuente: Referencia 9].	47
Figura 5-6: Ubicación del Nodo de Extracción de Datos de Olas [Fuente: Referencia 8].	49
Figura 5-7: ADCP Marca RD Instruments, Modelo WorkHorse Sentinel [Fuente: Referencia 10].	51
Figura 5-8: Principales Puntos de Medición de las Corrientes Euleriana [Fuente: Referencia 10].	53
Figura 5-9: Derivadores del Tipo Veleta Cruzada [Fuente: Referencia 10].	54
Figura 5-10: Lances Efectuados en Llenante [Fuente: Referencia 10].	55
Figura 5-11: Lances Efectuados en Vaciante [Fuente: Referencia 10].	56
Figura 5-12: Incidencia de las Corrientes "Invierno" [Fuente: Referencia 10].	59
Figura 5-13: Incidencia de las Corrientes "Verano" [Fuente: Referencia 10].	61
Figura 5-14: Características de las Corrientes en el Fondo Marino " Invierno" [Referencia 10].	62
Figura 5-15: Características de las Corrientes en el Fondo Marino "Verano" [Fuente: Referencia 10].	63
Figura 6-1: Esquema Funcionamiento TERMSIM II [Fuente: Referencia 1].	69
Figura 7-1: Movimientos de la Nave de Diseño [Fuente: Referencia 3].	71
Figura 8-1: Ubicación de las Esloras en un Buque [Fuente: Referencia 1].	74
Figura 8-2: Ubicación de los Puntos de Amarre "Fairleads" [Fuente: Referencia 12].	79
Figura 8-3: Ubicación de las Bitas [Fuente: Referencia 12].	80
Figura 8-4: Polipropileno 8 – Strand [Fuente: Referencia 1].	81
Figura 8-5: Sistema de Defensa Cell Fenders, Bridgestone [Fuente: Referencia 1].	87
Figura 9-1: Esquema Buque Granelero v/s Condiciones Oceanográficas [Fuente: Referencia 1].	89

REFERENCIAS

- Referencia 1:** OCIMF (1992). Mooring Equipment Guidelines. The Oil Companies International Marine Forum. London, British Library Cataloguing in Publication Data. 12p.
- Referencia 2:** Shore Protection Manual (SPM). Mechanics of Wave Motion. 1ª ed. Washington, USA, Department of the Army, 1984. 1 – 147p.
- Referencia 3:** Recomendación de Obras Marítimas Españolas (ROM 02 – 90). Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias, 1ª ed. Madrid, España, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1990. 183 – 220p.
- Referencia 4:** Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC DM – 26). Fleet Moorings. 2ª ed. Washington, USA, Basic Criteria and Planning Guidelines, 1985.325p.
- Referencia 5:** Documentos de Referencia (UNICAN). Dinámica Vol I. 1ª ed. Cantabria, España, Análisis de Oleaje, 2000.580p.
- Referencia 6:** Asociación Internacional Permanente de Congresos de Navegación (PIANC). Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours, 1ª ed. Washington, USA, A Practical Guide, 1995. 1 – 35p.
- Referencia 7:** Lloyds Register of Shipping. Rules and Regulations for the Classification of Ships, 3ª ed. London, United Kingdom, 1989.45p.
- Referencia 8:** Baird & Associates S.A. Estudio de Oleaje en Central Termoeléctrica de Mejillones. Santiago, Chile. 2009.61p.

-
- Referencia 9:** GEOMAR S.A. Estudio de Vientos en Mejillones para PROCON S.A. Ingeniería. Santiago, Chile. 2009. 130p.
- Referencia 10:** GEOMAR S.A. Estudio de Corrientes y Calidad del Fondo Marino en la Bahía de Mejillones para PROCON S.A. Ingeniería. Santiago, Chile. 2009. 145p.
- Referencia 11:** Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). Método Oficial para el Cálculo de los Valores No Armónicos de la Marea, 2ª ed. Valparaíso, Chile. 1999. 26p.
- Referencia 12:** PROCON S.A. Ingeniería. Criterio de Diseño Terminal Marítimo de Mejillones, 55p, 2009.
- Referencia 13:** Software Google Earth, versión 2009. Imágenes Satelitales de la Central Termoeléctrica de Mejillones [en línea] Washington, Usa <<http://earth.google.es/index>> [consulta: 15 Julio 2009].
- Referencia 14:** Dirección Meteorológica de Chile. Condiciones Climáticas de Mejillones [en línea] Santiago, Chile <<http://www.meteochile.cl/pronostico.html>> [consulta: 25 Julio 2009].
- Referencia 15:** Software Surface Modeling System (SMS), versión 8.1. Modelo Numérico Espectral STWAVE. Us Army Corps of Engineers (USACE). 2008.

1 INTRODUCCIÓN

En el marco de los estudios preliminares para el diseño de un muelle granelero en el puerto de Mejillones, que ejecuta y avala la empresa PROCON S.A. Ingeniería, se propone este tema para Proyecto de Título, cuyo objetivo central es determinar la operabilidad de un tipo de buque de diseño, simulando la condición futura del terminal de descarga de carbón en Mejillones. En lo medular, para logro del objetivo principal señalado, se ejecutará el estudio del comportamiento dinámico de buques amarrados, mediante un modelo numérico de respuesta de buque desarrollado por TERMSIM II del Maritime Research Institute Netherlands (MARIN), versión 2008, basado en la resolución de las ecuaciones de fuerza de oleaje, corrientes y viento (Referencia 1), sobre la estructura del buque.

Los parámetros y variables de ingreso y calibración del modelo, se obtendrán a partir de estudios existentes acerca de las condiciones oceanográficas, que fueron encargados especialmente por PROCON S.A. Ingeniería, a una empresa especializada en el rubro. Como parte del perfil académico de este Proyecto de Título, se incorpora un análisis de antecedentes donde está información es revisada y comentada en cuanto su fundamento y justificaciones teóricas.

Finalmente, se propondrán y estudiarán en detalle el sistema de atraque y amarre, características de cada nave y las restricciones al movimiento del buque. Con ello, y a partir de la aplicación del modelo calibrado, se obtendrán las tensiones en espías de amarre y reacciones en las defensas, así como rangos de desplazamiento, cuyos resultados serán comparados con las exigencias de la normativa vigente, verificando que el layout en estudio garantice una operación de transferencia de carga segura y eficiente.