



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

**“APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS PARA EL
ESTUDIO DE AGITACIÓN Y RESONANCIA
EN EL PUERTO DE VALPARAÍSO - CHILE”**

CRISTIAN JEAN PIERRE FLORES PÉREZ

2010

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

*“APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS PARA EL ESTUDIO DE AGITACIÓN Y
RESONANCIA EN EL PUERTO DE VALPARAÍSO”*

CRISTIAN JEAN PIERRE FLORES PÉREZ

COMISIÓN REVISORA	CALIFICACIONES	
	Nota	Firma
PROFESOR GUÍA SR. PATRICIO WINCKLER G.	_____	_____
PROFESOR INTEGRANTE SR. MANUEL CONTRERAS L.	_____	_____
PROFESOR INTEGRANTE SR. JAIME SERRANO C.	_____	_____

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

VIÑA DEL MAR, CHILE
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 del 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 Olas Chile 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.

Patricio Winckler Grez
Profesor Guía

Cristian Jean Pierre Flores Pérez
Alumno Memorista

AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que fueron partícipes en la elaboración de este documento, desde su gestación como idea hasta su ejecución.

Agradezco a mi familia, ya que ellos son la razón por la cual existo y alcanzo mis logros, cada vez que caía, ustedes me ayudaron a ponerme de pie y entregarme fuerzas para seguir mi camino.

A mis padres, ya que pese a lo ocurrido, nunca me negaron la posibilidad de completar mis estudios y siempre me dieron su apoyo costase lo que costase y ahora están viendo los frutos de sus esfuerzos.

Gracias a mi hermano, aún cuando en nuestras ideas existan diferencias, nunca dejaste de apoyarme y entregar tus mejores energías.

Agradecer al Profesor Patricio Winckler, por su aporte en la formación de mi carrera y las oportunidades que me entregó.

A la Universidad de Valparaíso, por facilitar los software y la estadística de oleaje, al Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de la Armada de Chile (CENDHOC), por la facilitación de datos; y a la Empresa Portuaria de Valparaíso (EPV) por la entrega de los antecedentes de estructuración y futuras expansiones del Puerto de Valparaíso.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que me brindaron su apoyo y experiencia para la elaboración de este documento, las cuales no nombro para no olvidarme de nadie.

A mi Familia

*Las personas no son recordadas por el número de veces que fracasan,
sino por el número de veces que tienen éxito.*

Thomas Alva Edison

ÍNDICE

CONTENIDO	PAG.
1 INTRODUCCIÓN	1.1
2 OBJETIVOS	2-1
2.1 OBJETIVO GENERAL	2-1
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2-1
3 METODOLOGÍA DE ESTUDIO	3-1
3.1 CONDICIONES DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS	3-1
3.2 MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE FRENTE AL PUERTO	3-2
3.2.1 GENERACIÓN DE GRILLAS.....	3-2
3.2.2 GENERACIÓN DE ESPECTROS.....	3-4
3.2.3 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.....	3-4
3.2.4 CLIMA DE OLEAJE FRENTE AL PUERTO.....	3-6
3.3 MODELO DE AGITACIÓN DE OLEAJE AL INTERIOR DEL PUERTO	3-6
3.3.1 GENERACIÓN DE BATIMETRÍA	3-6
3.3.2 PUNTOS DE EXTRACCIÓN	3-11
3.3.3 COEFICIENTES DE REFLEXIÓN	3-11
3.3.4 GENERACIÓN DE CAPAS DE ESPONJA	3-12
3.3.5 PROCEDIMIENTO DE LAS SIMULACIONES.....	3-12
3.3.6 CLIMA DE OLEAJE AL INTERIOR DEL PUERTO.....	3-13
3.3.7 CALIBRACIÓN	3-13
3.3.8 ESTIMACIÓN DE OPERATIVIDAD DE LOS SITIOS	3-14
3.4 ANÁLISIS DE RESONANCIA	3-14
4 RESULTADOS	4-1
4.1 CONDICIONES DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS	4-1
4.2 MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE FRENTE AL PUERTO	4-8
4.2.1 GENERACIÓN DE GRILLAS.....	4-8
4.2.2 GENERACIÓN DE ESPECTROS.....	4-10
4.2.3 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.....	4-11
4.2.4 CLIMA DE OLEAJE FRENTE AL PUERTO (NODO 1).....	4-12
4.3 MODELO DE AGITACIÓN DE OLEAJE AL INTERIOR DEL PUERTO	4-19
4.3.1 GENERACIÓN DE BATIMETRÍA	4-19
4.3.2 PUNTOS DE EXTRACCIÓN	4-21
4.3.3 COEFICIENTES DE REFLEXIÓN	4-24
4.3.4 GENERACIÓN DE CAPAS DE ESPONJA	4-29
4.3.5 PROCEDIMIENTO DE LAS SIMULACIONES.....	4-31
4.3.6 CLIMA DE OLEAJE AL INTERIOR DEL PUERTO.....	4-33
4.3.7 CALIBRACIÓN	4-35
4.3.8 ESTIMACIÓN DE OPERATIVIDAD DE LOS SITIOS	4-36
4.4 ANÁLISIS DE RESONANCIA	4-38
4.4.1 SITUACIÓN ACTUAL	4-38
4.4.2 ESCENARIO 1 – FRENTE COSTANERA	4-40
4.4.3 ESCENARIO 2 – EXTENSIÓN A PLAYA SAN MATEO	4-42
5 CONCLUSIONES	5-1
6 DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES	6-1

LISTA DE CUADROS

CUADRO 3.1: COORDENADAS DEL NODO 1	3-5
CUADRO 3.2: VALORES RECOMENDADOS PARA EL COEFICIENTE DE CAPA DE ESPONJA.....	3-12
CUADRO 3.3: PERÍODOS DE MEDICIÓN DE LA BOYA S4ADW	3-13
CUADRO 3.4: CONDICIONES LÍMITES DE OPERATIVIDAD PARA BUQUES PORTACONTENEDORES .	3-14
CUADRO 4.1: TABLA DE INCIDENCIA/BIVARIADA DE ALTURA DE OLAS Y PERÍODO EN EL NODO VALPARAÍSO.....	4-2
CUADRO 4.2: TABLA DE INCIDENCIA/BIVARIADA DE ALTURA DE OLAS Y DIRECCIÓN EN EL NODO VALPARAÍSO	4-3
CUADRO 4.3: TABLA DE INCIDENCIA/BIVARIADA DE PERÍODO Y DIRECCIÓN EN EL NODO VALPARAÍSO	4-4
CUADRO 4.4: LISTADO DE FIGURAS Y CUADROS PARA EL CLIMA DE OLEAJE EN NODO 1	4-12
CUADRO 4.5: TABLA DE INCIDENCIA/BIVARIADA DE ALTURA SIGNIFICATIVA Y PERÍODO PEAK EN EL NODO 1	4-13
CUADRO 4.6: TABLA DE INCIDENCIA/BIVARIADA DE ALTURA SIGNIFICATIVA Y DIRECCIÓN EN EL NODO 1	4-14
CUADRO 4.7: TABLA DE INCIDENCIA/BIVARIADA DE PERÍODO PEAK Y DIRECCIÓN EN EL NODO 1.	4-15
CUADRO 4.8: COORDENADAS (CON RESPECTO A LA GRILLA) DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN PARA LA SITUACIÓN ACTUAL.....	4-21
CUADRO 4.9: COORDENADAS (CON RESPECTO A LA GRILLA) DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN PARA EL ESCENARIO 1 – FRENTE COSTANERA	4-22
CUADRO 4.10: COORDENADAS (CON RESPECTO A LA GRILLA) DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN PARA EL ESCENARIO 2 – EXPANSIÓN PLAYA SAN MATEO	4-23
CUADRO 4.11: COEFICIENTES DE AGITACIÓN EN EL SITIO 1 PARA LA SITUACIÓN ACTUAL	4-31
CUADRO 4.12: COEFICIENTES DE AGITACIÓN EN EL SITIO 1 PARA EL ESCENARIO 1	4-32
CUADRO 4.13: COEFICIENTES DE AGITACIÓN EN EL SITIO 1 PARA EL ESCENARIO 2	4-32
CUADRO 4.14: TABLA DE INCIDENCIA/BIVARIADA DE ALTURA DE OLA Y PERÍODO PEAK EN EL SITIO 1 PARA LA SITUACIÓN ACTUAL	4-33
CUADRO 4.15: TABLA DE INCIDENCIA/BIVARIADA DE ALTURA DE OLA Y PERÍODO PEAK EN EL SITIO 1 PARA EL ESCENARIO 1 – FRENTE COSTANERA	4-34
CUADRO 4.16: TABLA DE INCIDENCIA/BIVARIADA ALTURA DE OLA Y PERÍODO PEAK EN EL SITIO 1 PARA EL ESCENARIO 2 – EXPANSIÓN PLAYA SAN MATEO	4-34
CUADRO 4.17: PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE ALTURA DE OLA	4-35
CUADRO 4.18: DISPONIBILIDAD ESTIMADA EN CADA SITIO, PARA CADA CASO ANALIZADO.	4-37
CUADRO 4.19: MODOS DE VIBRAR DE LA DÁRSENA PARA LA SITUACIÓN ACTUAL	4-39
CUADRO 4.20: MODOS DE VIBRAR DEL PUERTO DE VALPARAÍSO PARA ESCENARIO 1.....	4-41
CUADRO 4.21: MODOS DE VIBRAR DEL PUERTO DE VALPARAÍSO PARA ESCENARIO 2.....	4-44
CUADRO 4.22: MODOS DE VIBRAR DÁRSENA SECTOR SAN MATEO PARA ESCENARIO 2	4-46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: UBICACIÓN PUERTO DE VALPARAÍSO	1.1
FIGURA 3.1: UBICACIÓN NODO VALPARAÍSO.....	3-1
FIGURA 3.2: ESQUEMA DE GRILLAS ANIDADAS	3-3
FIGURA 3.3: UBICACIÓN DEL NODO 1	3-5
FIGURA 3.4: CONFIGURACIÓN SITUACIÓN ACTUAL	3-8
FIGURA 3.5: CONFIGURACIÓN ESCENARIO 1 – FRENTE COSTANERA.....	3-9
FIGURA 3.6: CONFIGURACIÓN ESCENARIO 2 – EXTENSIÓN A PLAYA SAN MATEO	3-10
FIGURA 3.7: RANGOS TÍPICOS DE COEFICIENTES DE REFLEXIÓN PARA OLAS DE CORTO PERÍODO ($T < 20s$)	3-11
FIGURA 3.8: COEFICIENTE DE AGITACIÓN EN EL TIEMPO.....	3-13
FIGURA 3.9: LÍNEA DE TIEMPO DE COMPARACIÓN MEDICIONES Y HINDCAST.....	3-14
FIGURA 3.10: ESPECTRO DE RUIDO BLANCO UTILIZADO EN LAS SIMULACIONES	3-17
FIGURA 3.11: UBICACIÓN DE LÍNEAS 1 A 4 EN SITUACIÓN ACTUAL, PUERTO DE VALPARAÍSO....	3-18
FIGURA 3.12: UBICACIÓN DE LÍNEAS 1 A 4 EN ESCENARIO 1, PUERTO DE VALPARAÍSO	3-18
FIGURA 3.13: UBICACIÓN DE LÍNEAS 1 A 6 EN ESCENARIO 2, PUERTO DE VALPARAÍSO	3-19
FIGURA 4.1: ROSA DE ALTURA DE OLA EN EL NODO VALPARAÍSO	4-5
FIGURA 4.2: ROSA DE PERÍODO PEAK EN EL NODO VALPARAÍSO	4-6
FIGURA 4.3: PLOTEO DE EXCEDENCIA DE HMO Y TP EN EL NODO VALPARAÍSO	4-7
FIGURA 4.4: GRILLA ANIDADADA PARA EL MODELO DE DIRECCIÓN SW.....	4-8
FIGURA 4.5: GRILLA ANIDADADA PARA EL MODELO DE DIRECCIÓN W	4-9
FIGURA 4.6: GRILLA ANIDADADA PARA EL MODELO DE DIRECCIÓN NW.....	4-10
FIGURA 4.7: EJEMPLO DE ESPECTRO TIPO JONSWAP UTILIZADO ($H_{m0} = 1[M]$, $T_p = 8[s]$)	4-10
FIGURA 4.8: FUNCIÓN DE TRASFERENCIA DEL OLEAJE, EN EL DOMINIO DE LAS ALTURAS, PARA EL NODO 1	4-11
FIGURA 4.9: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE OLEAJE, EN EL DOMINIO DE LAS DIRECCIONES, PARA EL NODO 1	4-12
FIGURA 4.10: ROSA DE ALTURA DE OLAS EN EL NODO 1	4-16
FIGURA 4.11: ROSA DE PERÍODO PEAK EN EL NODO 1	4-17
FIGURA 4.12: PLOTEO DE EXCEDENCIA DE HMO Y TP EN EL NODO 1	4-18
FIGURA 4.13: BATIMETRÍA DE LA SITUACIÓN ACTUAL.	4-19
FIGURA 4.14: BATIMETRÍA ESCENARIO 1 – FRENTE COSTANERA	4-20
FIGURA 4.15: BATIMETRÍA ESCENARIO 2 – EXTENSIÓN A PLAYA SAN MATEO.....	4-20
FIGURA 4.16: UBICACIÓN DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE DATOS PARA LA SITUACIÓN ACTUAL..	4-21
FIGURA 4.17: UBICACIÓN DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE DATOS PARA EL ESCENARIO 1 – FRENTE COSTANERA	4-22
FIGURA 4.18: UBICACIÓN DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE DATOS PARA EL ESCENARIO 2 – EXPANSIÓN PLAYA SAN MATEO	4-23
FIGURA 4.19: ZONIFICACIÓN BAHÍA DE VALPARAÍSO, PARA COEFICIENTES DE REFLEXIÓN.....	4-24
FIGURA 4.20: ESTRUCTURACIÓN TÍPICA DE LOS SITIOS Nº 1, 2 Y 3	4-25
FIGURA 4.21: PERFIL TÍPICO DEL SITIO Nº 4	4-25
FIGURA 4.22: PERFIL TÍPICO SITIO Nº 5 Y MUELLE PRAT	4-26
FIGURA 4.23: PERFIL TÍPICO SITIOS Nº 6, 7 Y 8	4-26
FIGURA 4.24: PERFIL TÍPICO MOLO DE ABRIGO	4-27
FIGURA 4.25: PERFILES TÍPICOS BORDE COSTERO ZONA 5.....	4-27
FIGURA 4.26: PERFIL TÍPICO BORDE COSTERO ZONA 6	4-28
FIGURA 4.27: PERFILES TÍPICOS BORDE COSTERO ZONA 7.....	4-28
FIGURA 4.28: PERFIL TÍPICO MUELLE BARÓN.....	4-29
FIGURA 4.29: CAPA DE ESPONJA UTILIZADA PARA LA MODELACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL....	4-30
FIGURA 4.30: CAPA DE ESPONJA UTILIZADA PARA LA MODELACIÓN DEL ESCENARIO 1	4-30
FIGURA 4.31: CAPA DE ESPONJA UTILIZADA PARA LA MODELACIÓN DE ESCENARIO 2.....	4-31
FIGURA 4.32: COEFICIENTES DE AGITACIÓN EN EL SITIO 1 DE PERÍODO PEAK 14 [s], PARA CADA ESCENARIO.....	4-33
FIGURA 4.33: CURVAS DE EXCEDENCIA DE ALTURA SIGNIFICATIVA PARA CADA CASO, EN EL SITIO 1.	4-35

FIGURA 4.34: PLOTEO DE EXCEDENCIA DE ALTURA DE OLA – ESTUDIO DE AGITACIÓN VERSUS MEDICIONES.....	4-36
FIGURA 4.35: ESPECTRO DE ENERGÍA PARA OLEAJE DE PERÍODO LARGO EN EL PUERTO DE VALPARAÍSO – SITUACIÓN ACTUAL.	4-38
FIGURA 4.37: ENVOLVENTE DE LA DÁRSENA – SEGUNDO MODO DE OSCILACIÓN LONGITUDINAL, PARA LA SITUACIÓN ACTUAL.....	4-39
FIGURA 4.38: ESPECTRO DE ENERGÍA PARA OLEAJE DE PERÍODO LARGO EN EL PUERTO DE VALPARAÍSO – ESCENARIO 1.....	4-40
FIGURA 4.40: ENVOLVENTE DE LA DÁRSENA – PRIMER MODO DE OSCILACIÓN LONGITUDINAL, PARA EL ESCENARIO 1.....	4-41
FIGURA 4.41: ESPECTRO DE ENERGÍA PARA OLEAJE DE PERÍODO LARGO EN EL PUERTO DE VALPARAÍSO – ESCENARIO 2.....	4-43
FIGURA 4.40: ENVOLVENTE DE LA DÁRSENA – PRIMER MODO DE OSCILACIÓN LONGITUDINAL, PARA EL ESCENARIO 2.....	4-44
FIGURA 4.44: ESPECTRO DE ENERGÍA PARA OLEAJE DE PERÍODO LARGO EN NUEVA DÁRSENA, SECTOR SAN MATEO – ESCENARIO 2.....	4-46

ANEXOS

Anexo A	Diagramas de transferencia STWAVE
Anexo B	Diagramas de agitación en la dársena para cada caso analizado
Anexo C	Coefficientes de agitación en cada sitio para cada caso analizado
Anexo D	Clima de oleaje en cada sitio para cada caso analizado
Anexo E	Análisis de resonancia

REFERENCIAS

- Ref. 1** Madsen, PA, R Murray and OR Sørensen. "A new form of the Boussinesq equations with improved dispersion characteristic", Coastal Engineering, 371-338, 1991.
- Ref. 2** Madsen, PA, R Murray and OR Sørensen. "A new form of the Boussinesq equations with improved dispersion characteristic. Part 2. A slowly-varying bathymetry", Coastal Engineering, 183-204, 1992.
- Ref. 3** Madsen, PA, OR Sørensen and HA Schäffer. "Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves". Coastal Engineering, 32, 255-287, 1997a.
- Ref. 4** Sørensen, OR, HA Schäffer and LS Sørensen. "Boussinesq-type modeling using an unstructured finite elements technique". Coastal Engineering, 50, 181-198, 2004.
- Ref. 5** Gierlevsen, T, M Hebsgaard and J Kirkegaard. "Wave disturbance modeling in the Port of Sines, Portugal - with special emphasis on long period oscillations". Paper for the International Conference on Port and Maritime R&D and Technology, Singapore, 29-31 octubre, 2001
- Ref. 6** Atria Baird Consultores S.A. "Clima de oleaje Bahía de Valparaíso", Octubre 2001.
- Ref. 7** Smith, JM, AR Sherlock and D Resio. "STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model. User's Manual, Version 3.0". U.S. Army Corps of Engineers, 2001.
- Ref. 8** Danish Hydraulic Institute. "MIKE 21 BW, Boussinesq Wave Module, User Guide", 2005.
- Ref. 9** Danish Hydraulic Institute. "MIKE 21, Boussinesq Wave Module, Scientific Documentation", 2005.
- Ref. 10** Danish Hydraulic Institute. "MIKE 21 BW, Step-by step training guide", 2005.
- Ref. 11** Puertos del Estado. ROM 3.1-99. "Proyecto de la configuración marítima de los puertos; Canales de acceso y áreas de flotación". España, 2000.
- Ref. 12** Nicolau, FJ. "Evaluación de Metodologías de Transferencia de Oleaje desde Aguas Profundas hacia Aguas Someras". Santiago, Universidad de Chile, 2004.
- Ref. 13** U. S. Army Corps of Engineers. "Coastal Engineering Manual". Volumen II, chapter 1, 2003

RESUMEN

El presente documento, denominado “Aplicación de Modelos Numéricos Para el Estudio de Agitación y Resonancia en el Puerto de Valparaíso”, tuvo por objetivo determinar las condiciones de agitación para la situación actual del Puerto de Valparaíso y dos configuraciones futuras, con el fin de evidenciar su efecto en la operatividad del mismo.

Para la situación actual se consideraron los 8 sitios del Puerto de Valparaíso que están actualmente en funcionamiento. La primera configuración futura analizada, frente costanera, contempla 7 sitios de atraque, de los cuales los sitios 1, 2 y 3 mantienen una ubicación similar a la actual. La segunda configuración considera el frente costanera junto con la expansión de la dársena hacia playa San Mateo, lo cual generaría 3 sitios de atraque adicionales.

Para la determinación del clima de oleaje al interior de la dársena, se realizó una propagación desde aguas profundas a un punto ubicado frente al puerto, mediante el uso del modelo STWAVE. Una vez obtenido el clima de oleaje frente al puerto, se procedió a determinar las condiciones de oleaje al interior de la dársena, mediante el uso del modelo de propagación del tipo Boussineq, denominado MIKE 21 BW.

Como resultado de este estudio se pudo inferir que, las tipologías planteadas para los nuevos sitios de atraque y las futuras configuraciones consideradas para el puerto, disminuyen la operatividad en los Sitios 1, 2 y 3, sin embargo no son relevantes.

Con el objeto de los resultados obtenidos se plantean recomendaciones de futuros estudios tales como el de buque atracado mediante modelo numérico o físico, para determinar con mayor exactitud la operatividad de los sitios, en cada uno de los casos de análisis.