



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**EFFECTOS EN LA AGITACIÓN Y RESONANCIA DE LOS
SITIOS DE ATRAQUE DEBIDO A LA CONSTRUCCIÓN DEL
FRENTE N°3, PUERTO DE IQUIQUE**

Eduardo Andrés Cosío Toledo

Agosto 2016

EFFECTOS EN LA AGITACIÓN Y RESONANCIA DE LOS SITIOS DE ATRAQUE DEBIDO A LA
CONSTRUCCIÓN DEL FRENTE N°3, PUERTO DE IQUIQUE

Eduardo Andrés Cosío Toledo

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Claudio Hernández Toro
Profesor guía

Patricio Winckler Grez
Integrante comisión

Matías Quezada Labra
Integrante comisión

SANTIAGO
Agosto 2016

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 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.

Eduardo Cosío Toledo
Autor

Claudio Hernández Toro
Profesor guía

AGRADECIMIENTOS

Al señor Claudio Hernández y la empresa GHD S.A por permitir mi desarrollo profesional en el área de la ingeniería marítima portuaria.

Al señor Matías Quezada por su amistad, humor y disposición en la elaboración del presente documento.

A los docentes de Ingeniería Civil Oceánica, señores Felipe Caselli, Ernesto Gómez y Álvaro Valdivia por la formación y valores entregados.

A mis pares con quién directa e indirectamente me relacioné, en especial al Señor Gerardo Cárdenas, con quién compartí amistad y enfrentamos los últimos semestres en aula.

A mi familia por el apoyo desinteresado e incondicional durante mi formación personal y académica.

Finalmente agradezco a Bárbara Oyanedel, mi esposa, por el tiempo invertido, comprensión, amor y haber sido fuente de inspiración para mirar el horizonte y finalizar este proceso.

Dedicado a Maritza Toledo y Roberto Fuentes

CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	GENERALIDADES	1
1.2	MOTIVACIÓN	1
2.	OBJETIVOS, LIMITACIONES Y EXCLUSIONES DEL ESTUDIO	2
2.1	OBJETIVOS	2
2.1.1	OBJETIVO GENERAL	2
2.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2.2	LIMITACIONES Y EXCLUSIONES DEL ESTUDIO	2
3.	PUERTO DE IQUIQUE	3
3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	3
3.2	RESEÑA HISTÓRICA	4
3.2.1	LICITACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y ADMINISTRACIÓN DEL PUERTO	5
3.3	GENERALIDADES OPERATIVAS DEL PUERTO	6
3.3.1	TRANSFERENCIA DE CARGAS	6
3.3.2	ESTUDIO DE DEMANDA	6
3.4	INFRAESTRUCTURA DEL PUERTO DE IQUIQUE	6
3.4.1	SECTOR A: MOLO DE ABRIGO	7
3.4.2	SECTOR B: ESPIGÓN DE ATRAQUE	8
3.4.3	SECTOR C: ASTILLERO Y EX MUELLE CORFO	8
3.4.4	SECTOR D: MOLO DE UNIÓN	8
3.4.5	SECTOR E: EXPLANADA SUR	8
3.5	PROYECCIÓN DEL FRENTE N°3	9
3.5.1	FRENTE N°3 – TIPOLOGÍA ESCOLLERA	10
3.5.2	FRENTE N°3 – TIPOLOGÍA CAJONES DE HORMIGÓN	11
3.5.3	NAVE DE DISEÑO	11
4.	MARCO TEÓRICO	12
4.1	OLEAJE	12
4.1.1	CARACTERIZACIÓN Y GENERACIÓN DE ONDAS	12
4.1.2	TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE	13
4.1.3	ESPECTROS DE OLEAJE	19
4.1.4	ESPECTROS DE OLEAJE SINTÉTICO MÁS EMPLEADOS	20
4.2	MODELOS PARA EL ESTUDIO DE AGITACIÓN PORTUARIA	22
4.2.1	MODELOS FÍSICOS	22
4.2.2	MODELOS NUMÉRICOS	22
4.3	RESONANCIA PORTUARIA	26
4.3.1	GENERALIDADES	26
4.3.2	ONDAS LARGAS	27
4.3.3	SEICHES 29	
4.3.4	ESTIMACIÓN DE LOS MODOS RESONANTES	30
5.	ANÁLISIS DE CONDICIONES NATURALES	33
5.1	BATIMETRÍA	33
5.1.1	CARTA NÁUTICA ELECTRÓNICA SHOA	33
5.1.2	LEVANTAMIENTOS BATIMÉTRICOS	34
5.2	MEDICIONES DE CAMPO DISPONIBLES	35
5.2.1	MEDICIÓN DE OLEAJE	37
5.2.2	MAREA	39

5.3	ESTUDIO ESPECTRAL DE OLEAJE	41
5.3.1	FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	42
5.3.2	CLIMA OPERACIONAL DE OLEAJE	44
6.	MODELO NUMÉRICO DE AGITACIÓN Y RESONANCIA	47
6.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MIKE 21 BW	47
6.1.1	ESQUEMA EN DIFERENCIAS FINITAS	49
6.2	CONFIGURACIÓN DEL MODELO NÚMÉRICO DE AGITACIÓN	50
6.2.1	DOMINIO NUMÉRICO	50
6.2.2	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	50
6.2.3	MODELO BATIMÉTRICO	51
6.2.4	REFLEXIÓN Y POROSIDAD	52
6.2.5	CAPAS DE ESPONJAS	54
6.2.6	CONDICIONES DE BORDE HIDRODINÁMICAS	55
6.2.7	PARÁMETROS FÍSICOS	56
6.2.8	TIEMPO DE SIMULACIÓN Y PASO DEL TIEMPO	56
6.3	RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO DE AGITACIÓN	57
6.3.1	RESULTADOS SITUACIÓN ACTUAL	57
6.3.2	RESULTADOS ESCENARIO DE EXPANSIÓN	66
6.4	MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA	74
6.4.1	ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE LOS PERÍODOS NATURALES	74
6.4.2	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN ESPECTRO DE RUIDO BLANCO	75
6.5	RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA	76
6.5.1	RESULTADOS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	76
6.5.2	RESULTADOS DEL ESCENARIO DE EXPANSIÓN	79
6.5.3	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RESONANCIA PARA AMBOS ESCENARIOS	81
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
7.1	CONCLUSIONES	83
7.2	RECOMENDACIONES	83
8.	REFERENCIAS	85
9.	ANEXOS	87
9.1	ANEXO A.	87
9.1.1	COEFICIENTES DE AGITACIÓN SITUACIÓN ACTUAL	87
9.1.2	COEFICIENTES DE AGITACIÓN ESCENARIOS DE EXPANSIÓN	88
9.1.3	COMPARACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE AGITACIÓN	89

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3.1: Ubicación geográfica del Puerto de Iquique.	3
Figura 3.2: Evolución del Puerto de Iquique. En orden de las agujas del reloj desde la imagen superior izquierda. a) Vista islote “Yquique”, 1861. b) Configuración portuaria de 2004. c) Configuración portuaria de 2006. d) Configuración portuaria de 2016.	5
Figura 3.3: Sectores de la actual configuración del Puerto de Iquique.	7
Figura 3.4: Fororrealismo construcción Frente N°3.	9
Figura 3.5: Secciones Frente N°3, tipología escollera. Sección cabeza (panel superior), sección media (panel inferior).	10
Figura 3.6: Secciones Frente N°3, tipología cajones de hormigón. Sección arranque (panel superior), sección media (panel inferior).	11
Figura 4.1: Clasificación de las ondas generadas en el océano.	12
Figura 4.2: Esquema de refracción para una onda.	15
Figura 4.3: Difracción de oleaje tras un dique semi infinito para oleaje oblicuo.	17
Figura 4.4: Principales formas de rotura del oleaje.	19
Figura 4.5: Ondas largas asociadas a grupos de ondas (bound long waves).	28
Figura 4.6: Registro de superficie libre en dos frecuencias de muestreo diferentes (Figura izquierda) y efecto de aliasing en el espectro de un registro de onda con intervalos de tiempo discretos (Figura derecha).	29
Figura 4.7: Primeros cuatro modos de oscilación de ondas para cuencas cerradas y abiertas.	31
Figura 4.8: Espectro de ruido blanco para determinar las frecuencias naturales.	32
Figura 5.1: Información carta náutica SHOA N°1211 – Bahía Iquique.	33
Figura 5.2: Levantamientos batimétricos consolidados.	34
Figura 5.3: Ubicación de las mediciones de campo disponibles.	35
Figura 5.4: Imágenes de las campañas de campo realizadas en el Puerto de Iquique.	36
Figura 5.5: Comparación entre altura significativa H_s , período significativo T_s y dirección media MWD. Al interior del Puerto (ADCP 1) y Offshore (ADCP 2) – Campaña verano.	37
Figura 5.6: Comparación entre altura significativa H_s , período significativo T_s y dirección media MWD. Al interior del Puerto (ADCP 1) y Offshore (ADCP 2) – Campaña invierno.	38
Figura 5.7: Registro de amplitud de marea (mareógrafo) para campaña verano.	39
Figura 5.8: Comparación del registro con el pronóstico de marea del SHOA.	40
Figura 5.9: Ubicación de los puntos de extracción de resultados.	41
Figura 5.10: Resultados típicos de la propagación de oleaje para $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], MWD=225 [deg] (panel izquierdo) y $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], MWD=315 [deg] (panel derecho).	42
Figura 5.11: Funciones de transferencia de altura de ola (panel superior) y dirección de ola (panel inferior) para Nodo P_0	43
Figura 5.12: Rosas de altura de oleaje (panel superior) y rosas de períodos de oleaje (panel inferior) en Nodo P_0	45
Figura 5.13: Curvas de probabilidad de excedencia para altura de ola (H_{m0}) – Nodo P_0	46
Figura 6.1: Esquema de discretización espacial en una grilla escalonada en x-y.	49
Figura 6.2: Definición del dominio empleado de acuerdo al oleaje incidente en Nodo P_0	50
Figura 6.3: Modelos batimétricos. A) Situación actual y B) Escenario de expansión (Frente N°3).	52
Figura 6.4: Tramos de reflexión en el dominio de modelación. a) Situación actual. b) Escenario de expansión, alternativa 1. c) Escenario de expansión, alternativa 2.	53
Figura 6.5: Curvas de reflexión vs porosidad para distintos períodos y profundidades.	54
Figura 6.6: Capas de esponjas. A) Situación actual. B) Escenario de expansión Alternativas 1 y 2.	55
Figura 6.7: Ejemplo de coeficiente de agitación para $H_{m0}=1.0$, $T_p=14$, MWD=220 [deg], situación actual.	56
Figura 6.8: Ubicación de los sensores numéricos para la situación actual.	57
Figura 6.9: Resultados típicos del modelo numérico para la situación actual. $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], MWD=220 [deg]. Diagrama de agitación de oleaje (panel superior). Diagrama de desnivelación instantánea (panel inferior).	58
Figura 6.10: Funciones de transferencia desde el Nodo P_0 hasta P1, P2, P3, P4 y Pm.	59
Figura 6.11: Curvas de excedencia H_{m0} [m] – Campaña verano.	60

Figura 6.12: Curvas de excedencia H_{m_0} [m] – Campaña invierno.	61
Figura 6.13: Coeficientes de agitación para la situación actual, nodos P1, P2, P3 y P4.	63
Figura 6.14: Curvas de excedencia de altura de ola (H_{m_0} [m]) en nodos P1, P2, P3 y P4.....	65
Figura 6.15: Ubicación de los sensores numéricos para el escenario de expansión.	66
Figura 6.16: Resultados típicos del modelo numérico para escenario de expansión. A) Alternativa 1 (panel izquierdo) y B) Alternativa 2 (panel derecho). $H_{m_0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], $MWD=220$ [deg].	67
Figura 6.17: Comparación de los coeficientes de agitación obtenidos para el escenario de expansión en el Sitio 5 para alternativas 1 y 2.	69
Figura 6.18: Variación porcentual en la agitación de los sitios de atraque entre la alternativa 1 (panel izquierdo) y alternativa 2 (panel derecho) con respecto a la situación actual para la condición hidrodinámica $MWD=220$ [deg] y $T_p =14$ [s]......	70
Figura 6.19: Curvas de excedencia de altura de ola (H_{m_0} [m]) en nodos P1, P2, P3, P4 y P5.	73
Figura 6.20: Dimensiones en planta de la dársena (panel izquierdo) y bahía (panel derecho) del Puerto de Iquique.	74
Figura 6.21: Ubicación de los nodos de extracción para la situación actual (panel izquierdo) y escenario de expansión (panel derecho).	76
Figura 6.22: Espectros de energía obtenidos de la simulación de ruido blanco en cada sitio de atraque, situación actual.	77
Figura 6.23: Frecuencias naturales de los sitios de atraque en el Puerto de Iquique, situación actual.	78
Figura 6.24: Espectros de energía obtenidos de la simulación de ruido blanco en cada sitio de atraque, alternativa 1.	79
Figura 6.25: Frecuencias naturales de los sitios de atraque en el Puerto de Iquique, escenario expansión, alternativa 1.	80
Figura 6.26: Comparación de los espectros de energía obtenidos en cada sitio de atraque en la situación actual y escenario de expansión.	81
Figura 9.1: Comparación de los coeficientes de agitación en P1 para todos los escenarios simulados.	89
Figura 9.2: Comparación de los coeficientes de agitación en P2 para todos los escenarios simulados.	90
Figura 9.3: Comparación de los coeficientes de agitación en P3 para todos los escenarios simulados.	91
Figura 9.4: Comparación de los coeficientes de agitación en P4 para todos los escenarios simulados.	92

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1: Transferencia histórica por tipo de carga del Puerto de Iquique.	6
Tabla 4.1: Clasificación de los tipos de ondas, fuerzas generadoras y restauradoras.....	13
Tabla 4.2: Relación entre la profundidad relativa y los efectos del fondo sobre el oleaje.	14
Tabla 4.3: Clasificación de rotura según el parámetro de Iribarren.	19
Tabla 4.4: Modos fundamentales y armónicos para cuencas rectangulares cerradas y abiertas.	31
Tabla 5.1: Coordenadas de los instrumentos fondeados para las mediciones de campo disponibles.	35
Tabla 5.2: Intervalos de tiempo de las campañas en terreno ejecutadas.....	36
Tabla 5.3: Planos mareales pronosticados para Iquique.	40
Tabla 5.4: Coordenadas del nodo de extracción P_0	41
Tabla 5.5: Tablas bivariadas nodo P_0 de H_{m_0} vs T_P (tabla superior), y MWD vs H_{m_0} (tabla inferior).	44
Tabla 6.1: Coeficientes de reflexión para cada tramo en el dominio de modelación.	53
Tabla 6.2: Coeficientes de porosidad para los diferentes tramos y períodos simulados.....	54
Tabla 6.3: Condiciones de oleaje simuladas.....	55
Tabla 6.4: Coordenadas de los sensores numéricos para situación actual.	57
Tabla 6.5: Parámetros estadísticos de altura de ola (H_{m_0} [m]).	61
Tabla 6.6: Parámetros estadísticos de dirección media de ola (MWD [deg]).	62
Tabla 6.7: Parámetros estadísticos de período peak de ola (T_P [s]).....	62
Tabla 6.8: Tablas bivariadas H_{m_0} v/s T_P para nodos P1, P2 y P3.....	64
Tabla 6.9: Tablas bivariadas H_{m_0} v/s T_P para nodo P4.	65
Tabla 6.10: Coordenadas de los sensores numéricos para el escenario de expansión.	66
Tabla 6.11: Coeficientes de agitación del Sitio 5 obtenidos para las alternativas 1 y 2.	68
Tabla 6.12: Variación porcentual en la agitación de cada escenario con respecto a la situación actual.	71
Tabla 6.13: Tablas bivariadas H_{m_0} v/s T_P para Nodos P1, P2 y P3.	72
Tabla 6.14: Tablas bivariadas H_{m_0} v/s T_P para Nodos P4 y P5.....	73
Tabla 6.15: Períodos naturales de oscilación obtenidos mediante formulaciones paramétricas.	75
Tabla 6.16: Coordenadas de los nodos de extracción para las simulaciones numéricas mediante espectro de ruido blanco.	76
Tabla 6.17: Modos resonantes del Puerto de Iquique , situación actual.	78
Tabla 6.18: Modos resonantes del Puerto de Iquique , escenario expansión, alternativa 1.	80
Tabla 6.19: Frecuencias peaks para ambos escenarios.	82
Tabla 9.1: Coeficientes de agitación de los nodos de extracción para la situación actual.	87
Tabla 9.2: Coeficientes de agitación de los nodos de extracción para el escenario de expansión.....	88

RESUMEN

El Puerto de Iquique está situado en la Región de Tarapacá, Chile, su ubicación geográfica lo posiciona como una puerta natural de exportación e importación para productos manufacturados y materias primas, producidas en el Cono Central de Sudamérica hacia los mercados internacionales y viceversa. El año 2014 el recinto portuario transfirió 2.2 millones de toneladas y se proyecta hacia el año 2030 en un escenario conservador y otro favorable 5.5 y 7.0 millones de toneladas respectivamente, donde el 75% corresponderán a contenedores. Por lo anterior, la Empresa Portuaria de Iquique (en adelante EPI) proyecta la construcción de un nuevo terminal marítimo denominado Frente N°3 con capacidad de atender una nave tipo New Panamax.

Para verificar los efectos de la construcción del Frente N°3 en la agitación de oleaje y resonancia del recinto portuario se utilizó el modelo numérico MIKE 21 BW, desarrollado por Danish Hydraulic Institute (DHI) el cual está basado en las ecuaciones de Boussinesq desarrolladas por Madsen et al. (1991) y modificadas por Madsen & Sørensen (1992). La herramienta fue validada de acuerdo a lo indicado en el instructivo SHOA, Pub. N°3201, empleando mediciones de campo para verano e invierno de 2015. Posteriormente el modelo se explotó para dos escenarios de simulación. El primero correspondió a la situación actual y el segundo a la construcción del Frente N°3, este último analizado para la denominada Alternativa 1 (tipología de escolleras de protección) y Alternativa 2 (tipología de cajones de hormigón armado). Se determinó que actualmente todos los sitios de atraque presentan excedencias de olas menores a 0.75 [m] y que para la construcción del Frente N°3, la Alternativa 1 genera mejores condiciones de agitación, donde las alturas no excederían los 0.30 [m] para todos los sitios de atraque.

Con relación a la resonancia se obtuvieron las frecuencias naturales de los sitios de atraque mediante la implementación de espectros sintéticos de ruido blanco (*white noise*). La metodología está contenida en el estado del arte (Giervelvse et al. (2001) y Koef-Hansen et al. (2005)) con lo cual se determinó que para la situación actual y escenario de expansión, los períodos de oscilación están contenidos entre 0.5 y 4 minutos. El modo de oscilación más bajo (Helmholtz) se encuentra asociado a una longitud de onda de 6780 [m], el cual provocaría un movimiento vertical de la superficie del agua de pocos centímetros. En general, los períodos que podrían hacer resonar el Puerto de Iquique se encuentran entre 33 y 81 [s] (0.030 a 0.0127 [Hz]), sin embargo se desconoce si forzantes de dichas características (grupos de ondas u ondas largas libres) se presentan en la zona de estudio ni la forma en que podrían ingresar al recinto portuario.