

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DE RESONANCIA PORTUARIA:
GENERACIÓN, TRANSITORIEDAD,
NO LINEALIDAD Y ACOPLAMIENTO
GEOMÉTRICO

Presentada por: D. GABRIEL DÍAZ HERNÁNDEZ

Dirigida por: D. IÑIGO JAVIER LOSADA RODRÍGUEZ
D. MAURICIO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Marzo, 2006

*A mi madre,
a Elena,
y a mi familia*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de México, a través del programa de becas para estudios de doctorado en el extranjero que otorga el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT.

Becario No. 161140.

Dedico esta Tesis a mis tutores, profesores, personal administrativo, y compañeros de estudio y trabajo, que conforman el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas GIOC, de la Universidad de Cantabria, por su apoyo constante y la amistad otorgada.

Agradezco especialmente al Prof. Iñigo Losada, por haberme aceptado en el programa de doctorado, y por guiar con sabiduría y paciencia mi estancia doctoral desde el primer momento, ofreciendo su ayuda incondicional, y su dedicación constante.

Agradezco al Dr. Mauricio González, codirector de esta investigación doctoral, por aportar nuevas ideas y metodologías a este trabajo de Tesis.

Extiendo mi agradecimiento más sincero los Profesores Dr. Raúl Medina, y Dr. César Vidal por sus sabios consejos, su amistad, sus invaluable enseñanzas en clase, y su constante dedicación al grupo.

Agradezco a D. Sebastià Montserrat del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, IMEDEA, por la base de datos de la campaña LAST-97.

Este trabajo de Tesis no se hubiera podido realizar sin la participación activa, y el conocimiento compartido en todo momento de D. José María González en la matemática y programación, D. Leonardo Migoya en la física aplicada, y D. Javier L. Lara en los estudios estadísticos y numéricos. Muchas gracias.

Agradezco a Yolanda Pérez por su constante e incondicional apoyo, su amistad y las innumerables charlas de café.

Mi sincero agradecimiento a Jesús Arriaga y a Isabel Falagán por la ayuda ofrecida.

Muchas gracias al Dr. Pedro Lomónaco, y a la Dra. Cynthia Martínez, por su apoyo, generosidad y amistad, dentro y fuera del grupo. Agradezco también al Dr. Fernando Méndez, a la Dra. Sonia Castanedo, a la Dra. Soledad Requejo, y al Dr. Nicolás García, por ofrecer su apoyo en todo momento de forma desinteresada. Agradezco especialmente al Dr. Francisco Martín por su tutoría durante mi trabajo de Master y su infalible punto de vista.

Muchas gracias a mis compañeros y amigos de Santander, Jurgi, Jaime, Maitane, Melisa, María, Ana, Omar, Nuno, Vanessa, Alec, Gaby, Andrés, Tatiana, Pablo, Titi, Oscarín, Antonio, Raúl, Hana, Paula, Vero, y Susana, por ser un grupo de amigos tan solidario y enriquecedor.

Agradezco al Dr. Rodolfo Silva, al Dr. Paulo Salles, y al Dr. Georges Govaere, así como a mis compañeros del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Un especial agradecimiento a mis amigos y colegas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, Adrián Pedrozo, Adolfo Contreras, Carlos González, Oscar Pozos, y Francisco Núñez, por ser cómplices en esta aventura de doctorado en el extranjero. Muchas gracias.

De igual forma agradezco profundamente a mis grandes amigos en el D. F., a Federico Robles, Eduardo Veyán, Gerardo Horta, Gabriel Castillo, Víctor Garcés, Olivia Domínguez, Roberto Pérez, Juan Manuel de Polanco, y Adolfo Sarabia, por conservar la amistad en todo momento.

Finalmente quisiera agradecer a mi amigo Juan Pablo Agudelo por su amistad, la música, y el tiempo compartido en Santander, y también por recordarme constantemente que hay vida después del doctorado.

RESUMEN

La resonancia tiene lugar en dominios o cuerpos de agua semi-encerrados tales como puertos, bahías o calas, si alguno de los modos naturales (propios) de oscilación es excitado por un forzamiento exterior. La energía que, proveniente del exterior, accede al recinto semi-encerrado queda atrapada, y se amplifica, dando lugar a oscilaciones interiores que pueden llegar a tener, ocasionalmente, amplitudes mucho mayores de lo habitual. Los mecanismos de forzamiento de la resonancia pueden ser muy variados e incluir, entre otros, ondas infragravitatorias generadas por el oleaje, ondas largas inducidas por actividad sísmica de los fondos marinos o deslizamientos submarinos (tsunamis) u ondas largas debidas a perturbaciones de la presión atmosférica. La probabilidad de ocurrencia de un evento de resonancia dependerá: de la probabilidad de ocurrencia del forzamiento, lo que dependerá a su vez de la localización geográfica del puerto o bahía; de las características de dicho forzamiento; de la configuración geométrica del cuerpo en cuestión y del volumen de agua semi-encerrado.

Esta Tesis Doctoral se ha dedicado al estudio de la hidrodinámica asociada a los procesos de resonancia en dominios semi-encerrados. Más específicamente, el esfuerzo fundamental se ha centrado en la caracterización de los elementos forzadores, las características no lineales del forzamiento y de la respuesta de los puertos, la transitoriedad del fenómeno y de la incidencia sobre la respuesta del potencial acoplamiento de la respuesta de recintos adyacentes. Es decir, los conceptos fundamentales sobre los que se ha centrado en esta Tesis la investigación del fenómeno de la resonancia son: la generación, la no linealidad, la transitoriedad y el acoplamiento geométrico.

Los objetivos planteados son tres: 1) ampliar nuestro conocimiento sobre el fenómeno, profundizando el análisis de los conceptos anteriormente mencionados; 2) mejorar nuestra capacidad para reproducir el fenómeno con el fin de contribuir a proporcionar vías alternativas para realizar estudios de retro-análisis y predicciones del fenómeno y finalmente, 3) integrar toda la investigación, metodologías y herramientas elaboradas en una metodología capaz de mejorar sustancialmente la aproximación que se hace hoy en día al problema.

Para ello, y después de un análisis exhaustivo del estado del arte, se hace uso de una metodología que integra la aproximación teórica, con la información de medidas en el campo, modelado físico en el laboratorio y simulación numérica.

A continuación se resume los diferentes hitos y las aportaciones más relevantes de esta Tesis.

En primer lugar, el estudio de la generación se aborda, presentando una nueva metodología de análisis cuyo objetivo es caracterizar las oscilaciones de baja frecuencia (onda larga, $600s < T < 30s$), existentes en los registros instrumentales de oleaje (onda corta, $30s < T < 4s$) medidos en campo (Gijón y Lastres), como posibles elementos forzadores del fenómeno de resonancia portuaria. A partir de la misma, se obtienen los valores característicos espectrales para la onda larga asociada a los espectros de onda corta medidos. Estos sirven como forzamiento del modelo numérico. La metodología se muestra como adecuada y servirá de base para nuevos estudios en otras campañas de nuestro litoral.

En segundo lugar, se plantea la ejecución de una exhaustiva campaña de experimentación en modelo físico que tiene como misión fundamental incrementar nuestro conocimiento sobre la no linealidad, la transitoriedad y el acoplamiento geométrico y su incidencia sobre la resonancia portuaria. Este trabajo experimental es el más completo (por la cantidad de procesos considerados) y detallado, en términos de geometrías, forzamientos y medidas, del que tenemos referencia. Además, esta base de datos será un elemento fundamental para la calibración y validación del modelo numérico utilizado en esta Tesis y de otros modelos en desarrollo.

En tercer lugar, se presenta un modelo numérico (modelo MANOLO) que se basa en las ecuaciones extendidas de Boussinesq, inicialmente desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas GIOC, de la Universidad de Cantabria. y la Universidad de Cornell. En esta Tesis, el modelo ha sido mejorado, validado con datos teóricos, con datos provenientes de la simulaciones físicas en laboratorio, diseñadas *ex profeso* para esta investigación, así como con las series temporales de superficie libre de la campaña de campo LAST-97, llevada a cabo por el GIOC y el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, IMEDEA. En dichas campañas se registraron importantes

episodios reales de resonancia, dentro del puerto de Ciutadella y la cala Platja Gran localizados en la costa Oeste de la isla de Menorca. La aplicación del modelo a estos casos, con grandes mallas y series muy largas de forzamiento, ha requerido mejorar considerablemente las capacidades del modelo inicialmente desarrollado.

La validación del modelo, tanto con los datos procedentes del modelado físico como con los casos considerados en Ciudadela, ha mostrado resultados excelentes, por lo que el modelo MANOLO, puede considerarse, hoy por hoy, el modelo en elementos finitos más avanzado en su género, al considerar la generación de onda larga por onda corta (**generación**), la **no linealidad** y la **transitoriedad** del proceso resonante, así como las consecuencias sobre el mismo del **acoplamiento geométrico**. Más aún, se ha demostrado que el modelo es suficientemente robusto y estable como para considerar forzamientos durante largos intervalos de tiempo con tiempos de ejecución muy razonables.

Finalmente, esta Tesis presenta una metodología integral para el estudio de agitación y resonancia en puertos, exponiendo las fuentes de datos que se deben de considerar en cualquier estudio, el tratamiento de dichos datos, la caracterización de los elementos forzadores, y la aplicación de los modelos numéricos a ser empleados, presentando una serie de recomendaciones que se deben de seguir en función de los objetivos particulares de cada estudio a realizar.

Adicionalmente, se presenta un ejemplo de aplicación de la metodología, a través de un estudio básico de agitación y resonancia portuaria en el puerto de Lastres, localizado en el Principado de Asturias, validado con datos de campo provenientes de la campaña 2001-2002 realizada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX y el GIOC, siguiendo la metodología propuesta.

Esta metodología, producto de la integración de las diferentes aportaciones que se han realizado en esta Tesis y de algunas contribuciones presentes en el estado del arte, constituye una nueva aproximación al problema de la agitación y resonancia portuaria que mejora sustancialmente el estado del arte y abre nuevas perspectivas para el futuro.

RESUMEN

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	
1.1.1 <i>Exposición de motivos</i>	3
	3
1.2 ELEMENTOS A CONSIDERAR DENTRO DEL ESTUDIO DE LA RESONANCIA PORTUARIA	6
1.2.1 <i>Generación</i>	7
1.2.2 <i>Transitoriedad</i>	8
1.2.3 <i>No linealidad, Dispersividad y mecanismos disipadores</i>	10
1.2.4 <i>Acoplamiento geométrico</i>	13
1.3 ESTUDIO DEL FENÓMENO DE RESONANCIA PORTUARIA	15
1.3.1 <i>Análisis de series temporales medidas en campo</i>	15
1.3.2 <i>Modelación física en laboratorio</i>	16
1.3.3 <i>Modelado numérico del fenómeno de resonancia portuaria</i>	18
1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	23
CAPÍTULO 2	
ESTADO DEL ARTE	27
2.1 INTRODUCCIÓN	29
2.2 DEFINICIÓN DE RESONANCIA PORTUARIA	31
2.3 ONDAS LARGAS ASOCIADAS A LA RESONANCIA PORTUARIA	33
2.3.1 <i>Ondas largas vinculadas a grupos</i>	34
2.3.2 <i>Ondas largas atmosféricas</i>	37
2.4 ESTUDIOS DE LABORATORIO SOBRE EL ANÁLISIS DE LA RESONANCIA PORTUARIA	40
2.5 MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FENÓMENO DE RESONANCIA PORTUARIA	45
2.5.1 <i>Modelos de oleaje aplicados a la agitación portuaria</i>	45
2.5.2 <i>Modelos de oleaje basados en las ecuaciones de Boussinesq</i>	50
2.6 CONCLUSIONES	60

CAPÍTULO 3	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS	63
3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	65
3.2 OBJETIVOS	68
3.2.1 <i>Objetivos generales</i>	68
3.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	69
3.3 METODOLOGÍA	70
CAPÍTULO 4	
ONDAS LARGAS, ANÁLISIS Y GENERACIÓN	77
4.1 INTRODUCCIÓN	79
4.2 OBJETIVO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS ONDAS LARGAS	81
4.2.1 <i>Planteamiento del problema</i>	81
4.3 ESTUDIOS EXISTENTES EN LA LITERATURA	84
4.4 BASE DE DATOS EMPLEADA Y CAMPAÑAS DE CAMPO	88
4.4.1 <i>Campaña del puerto de Gijón</i>	89
4.4.2 <i>Campaña del puerto de Lastres</i>	92
4.5 METODOLOGÍA	95
4.5.1 <i>Preprocesado de la señal</i>	96
4.5.2 <i>Selección de los estados de mar</i>	99
4.5.3 <i>Ajuste empírico</i>	101
4.5.4 <i>Aplicación de la transformada wavelet</i>	112
4.6 CONCLUSIONES	121
4.6.1 <i>Sobre la naturaleza de la onda larga</i>	121
4.6.2 <i>Conclusiones sobre la caracterización de la onda larga</i>	122
4.6.3 <i>Conclusiones sobre las limitaciones de la metodología</i>	124

CAPÍTULO 5	
DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE LABORATORIO	125
5.1 INTRODUCCIÓN	127
5.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO	129
5.2.1 <i>Canal de oleaje</i>	129
5.2.2 <i>Pala generadora del oleaje</i>	131
5.2.3 <i>Instrumentación</i>	132
5.3 METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN	133
5.3.1 <i>Construcción de las configuraciones portuarias</i>	133
5.3.2 <i>Elección de las geometrías de los puertos y casos a ensayar</i>	136
5.3.3 <i>Zonificación del área de estudio</i>	139
5.4 PRE-PROCESO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ENSAYOS	142
5.4.1 <i>Definición de los parámetros adimensionales del oleaje</i>	142
5.4.2 <i>Análisis de calidad y repetitividad de los datos</i>	148
5.5 CONCLUSIONES	152
CAPÍTULO 6	
MODELADO NUMÉRICO DE LA RESONANCIA PORTUARIA	153
6.1 INTRODUCCIÓN	155
6.2 ANTECEDENTES DEL MODELO NUMERICO	157
6.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO	158
6.3.1 <i>Ecuaciones de gobierno</i>	159
6.3.2 <i>Esquema numérico de aproximación espacial</i>	173
6.3.3 <i>Esquema de integración temporal</i>	177
6.3.4 <i>Condiciones de contorno</i>	180
6.3.5 <i>Términos de disipación</i>	193
6.3.6 <i>Límites de aplicación del modelo numérico</i>	196
6.4 TRABAJOS PRELIMINARES DE VALIDACIÓN	201
6.4.1 <i>Evolución del movimiento del fluido en una dársena rectangular cerrada</i>	203
6.4.2 <i>Propagación del oleaje sobre un bajo batimétrico, (Berkhoff et al. (1982))</i>	207
6.4.3 <i>Propagación de oleaje sobre una lente batimétrica, (Whalin (1971))</i>	214
6.4.4 <i>Resonancia en una bahía rectangular</i>	218
6.5 CONCLUSIONES	234

CAPÍTULO 7	
MODELADO NUMÉRICO DE LOS CASOS EXPERIMENTALES	237
7.1 INTRODUCCIÓN	239
7.2. CONFIGURACIÓN DE LOS CASOS NUMÉRICOS Y CALIBRACIÓN PRELIMINAR	241
7.2.1 Metodología a seguir	242
7.2.2 Diseño de los casos a modelar	243
7.2.3 Resumen del trabajo de calibración	262
7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS CON LAS SERIES EXPERIMENTALES DE DATOS	264
7.3.1 Introducción	264
7.3.2 Un solo puerto abierto	266
7.3.3 Dos puertos abiertos	278
7.3.4 Resultados comparativos de los puertos resonantes	301
7.3.5 Simulaciones adicionales	324
7.4 CONCLUSIONES Y MEJORAS	345
7.4.1 Conclusiones	345
7.4.2 Aspectos a mejorar del modelo	347
CAPÍTULO 8	
MODELADO NUMÉRICO DE UN CASO REAL	349
8.1 INTRODUCCIÓN	351
8.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y CAMPAÑA DE CAMPO	354
8.2.1 Zona de la zona de estudio	354
8.2.2 Descripción de la campaña LAST-97	356
8.3 ESTUDIOS PREVIOS	360
8.3.1 Referentes a las oscilaciones de largo periodo observadas en las Islas Baleares	360
8.3.2 Estudios previos referentes a las simulaciones numéricas del Puerto de Ciutadella	362
8.4 DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS	369
8.4.1 Series de oscilaciones seleccionadas	370
8.4.2 Tratamiento de las series a modelar	372
8.4.3 Definición del dominio numérico	377

8.5 RESULTADOS Y COMPARACIONES NUMÉRICAS	385
8.5.1 <i>Series temporales de superficie libre</i>	385
8.5.2 <i>Espectros de energía</i>	392
8.5.3 <i>Factores de amplificación</i>	400
8.5.4 <i>Análisis con la técnica wavelet</i>	403
8.6 CONCLUSIONES	417
8.6.1 <i>Conclusiones</i>	417
8.6.2 <i>Aspectos a mejorar del modelo</i>	420
CAPÍTULO 9	
CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO	421
9.1 CONCLUSIONES	423
9.1.1 <i>Introducción</i>	425
9.1.2 <i>Conclusiones sobre la caracterización de los elementos forzadores</i>	426
9.1.3 <i>Conclusiones sobre el trabajo experimental y la modelación numérica</i>	429
9.1.4 <i>Conclusiones sobre la metodología integral de estudios de agitación portuaria</i>	
9.2 FUTURAS LINEAS DE TRABAJO	431
CAPÍTULO 10	435
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXO I	
METODOLOGÍA DE TRABAJO Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA EL ESTUDIO DE AGITACIÓN Y RESONANCIA EN PUERTOS	459
I.1 INTRODUCCIÓN	461
I.2 DATOS DE PARTIDA	464
I.2.1 <i>Datos topo-batimétricos</i>	464
I.2.2 <i>Fuentes de oleaje</i>	466
I.2.3 <i>Nivel del mar</i>	474
I.2.4 <i>Evaluación de las bases de datos</i>	475
I.3 DETERMINACIÓN DE LOS ELEMENTOS FORZADORES	478
I.3.1 <i>Caracterización de los elementos forzadores</i>	479
I.3.2 <i>Caracterización del tipo de estudios y datos de entrada en el análisis hidrodinámico de puertos</i>	488

I.4 ESTRATEGIAS Y RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE PROPAGACIÓN EN PUERTOS	501
<i>I.4.1 Identificación analítica de los modos naturales de oscilación en puertos con geometrías simples</i>	505
<i>I.4.2 Propagación de oleaje modelo parabólico OLUCA</i>	508
<i>I.4.3 Análisis lineal, modelo MSP</i>	509
<i>I.4.4 Análisis no lineal, modelo MANOLO</i>	518
I.5 TRATAMIENTO DE RESULTADOS	529
I.6 EJEMPLO DE APLICACIÓN, ESTUDIO DE RESONANCIA EN EL PUERTO DE LASTRES	535
<i>I.6.1 Determinación de los modos naturales de oscilación, aproximación lineal</i>	535
<i>I.6.2 Determinación de los elementos forzadores</i>	542
<i>I.6.3 Validación del modelo MANOLO con datos de campo</i>	548
<i>I.6.4 Simulación numérica de las series JONSWAP + onda larga, aproximación no lineal</i>	559
I.7 CONCLUSIONES	569

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 4

<i>Figura 4.1. Registros de un sensor de presión (línea azul) colocado a la profundidad de 22m en la bocana del Puerto de Gijón, y su componente de onda larga (línea roja).</i>	82
<i>Figura 4.2. Localización del sensor de presión en el Puerto de Gijón.</i>	90
<i>Figura 4.3. Carta náutica de la zona del Puerto de Lastres: Instituto Hidrográfico de la Marina.</i>	92
<i>Figura 4.4 Localización de los equipos dentro y fuera del puerto de Lastres.</i>	93
<i>Figura 4.5. Registro de presión reflejado por el sensor (figura superior, línea azul) y magnitud de la marea (figura superior, línea gris); registro de presión resultado de sustraer la marea y el nivel medio (figura inferior, línea azul).</i>	96
<i>Figura 4.6. Espectro de energía del burst 101120221 W2 de Lastres, en la banda de energía infragravitatoria, con introducción de ceros en la señal (línea continua) y sin dicha introducción (línea discontinua).</i>	98
<i>Figura 4.7. Espectro medido (azul) y el espectro JONSWAP ajustado (línea roja), para un oleaje tipo swell (figura superior) y uno compuesto por dos oleajes.</i>	100
<i>Figura 4.8. Sensor de Gijón. Historia de la evolución de la altura significativa de ola (Hs) (primera gráfica), periodo de pico (Tp) (segunda gráfica) para onda corta, altura significativa de ola (Hs*) (tercera gráfica), periodo de pico (Tp) (cuarta gráfica) para onda larga, coeficiente de correlación en el ajuste con un espectro JONSWAP (figura inferior, línea) y burst con coeficiente de correlación >0.97 (figura inferior, puntos).</i>	102

<i>Figura 4.9. Sensor de Lastres. Historia de la evolución de la altura significativa de ola (Hs) (primera gráfica), periodo de pico (Tp) (segunda gráfica) para onda corta, altura significativa de ola (Hs*) (tercera gráfica), periodo de pico (Tp) (cuarta gráfica) para onda larga, coeficiente de correlación en el ajuste con un espectro JONSWAP (figura inferior, linea) y burst con coeficiente de correlación >0.97 (figura inferior, puntos).</i>	103
<i>Figura 4.10. Resultado del ajuste para los datos analizados en el Puerto de Gijón. Valores utilizados en el ajuste con coeficiente de correlación >97%, (puntos rojos). Todos los valores medidos, (Puntos azules).</i>	106
<i>Figura 4.11. Resultado del ajuste para los datos analizados en el Puerto de Lastres. Valores utilizados en el ajuste con coeficiente de correlación >97%, (puntos rojos). Todos los valores medidos, (Puntos azules).</i>	107
<i>Figura 4.12 Resultado del ajuste para los datos utilizados en el ajuste (>97%), para la los datos de periodo pico de onda larga medidos en el puerto de Gijón.</i>	109
<i>Figura 4.13 Evolución de la relación T_p (onda larga) / T_p (onda corta), a lo largo de los burst utilizados para el análisis para el Puerto de Gijón.</i>	109
<i>Figura 4.14 Densidad de energía espectral para burst de medida consecutivos, correspondientes a un temporal de la campaña de Lastres, para las bandas gravitatoria (azul) e infragravitatoria (escalados x50) (rojo).</i>	111
<i>Figura 4.15 Función madre tipo Morlet. parte real (línea continua), parte imaginaria (puntos).</i>	116
<i>Figura 4.16 Registros de presión correspondientes a la banda gravitatoria (panel superior) y a la banda infragravitatoria (tercer panel), y sus correspondientes espectros wavelet. Fecha 28/11/01 18:00 hrs.</i>	118
<i>Figura 4.17 Registros de presión correspondientes a la banda gravitatoria (panel superior) y a la banda infragravitatoria (tercer panel), y sus correspondientes espectros wavelet. Fecha 28/11/01 21:00 hrs.</i>	118

<i>Figura 4.18 Registros de presión correspondientes a la banda gravitatoria (panel superior) y a la banda infragravitatoria (tercer panel), y sus correspondientes espectros wavelet. Fecha 29/11/01 00:00 hrs.</i>	119
<i>Figura 4.19 Registros de presión correspondientes a la banda gravitatoria (panel superior) y a la banda infragravitatoria (tercer panel), y sus correspondientes espectros wavelet. Fecha 29/11/01 03:00 hrs.</i>	119
CAPÍTULO 5	
<i>Figura 5.1 Canal del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.</i>	129
<i>Figura 5.2. Diagrama de las dimensiones del canal.</i>	130
<i>Figura 5.3. Zona de generación del oleaje y estructura de sustentación del pistón - pala generadora.</i>	132
<i>Figura 5.4 Construcción de los dos puertos longitudinales.</i>	134
<i>Figura 5.5 Dos puertos longitudinales construidos en el canal de oleaje.</i>	135
<i>Figura 5.6 Colocación de los sensores de presión modelo PCR830.</i>	136
<i>Figura 5.7 Colocación longitudinal de los sensores de nivel para la zona de incidencia del oleaje.</i>	140
<i>Figura 5.8 Localización de los puntos de medición dentro de las zonas de estudio.</i>	141
<i>Figura 5.9 Registro de superficie libre para el ensayo 0101, el sensor 1 y las repeticiones A, B y C. Mostrando el segmento temporal para el análisis espectral.</i>	149
<i>Figura 5.10 Espectros de amplitudes para los cuatro armónicos principales de las series de superficie libre. Sensores 1, 2 y 3 y sus repeticiones A, B y C.</i>	150

<i>Figura 5.11 Comparaciones de los errores relativos máximos entre las 3 repeticiones dentro de la zona de incidencia. a) Primer armónico, b) segundo armónico, c) tercer armónico.</i>	151
--	-----

CAPÍTULO 6

<i>Figura 6.1 Funciones de forma global y local, tomado de GIOC (2001).</i>	176
<i>Figura 6.2 Esquema del dominio computacional y del contorno.</i>	182
<i>Figura 6.3 Comparación del % de error relativo entre diferentes valores de α y la teoría lineal para la celeridad de fase.</i>	199
<i>Figura 6.4 Comparación del % de error relativo entre diferentes valores de α y la teoría lineal para la celeridad de grupo.</i>	199
<i>Figura 6.5 Dominio numérico rectangular y puntos de medición propuestos.</i>	204
<i>Figura 6.6 Comparación de los registros de superficie libre hasta el tiempo $t=50s$, para los 8 puntos seleccionados. FUNWAVE © (línea continua), MANOLO (puntos).</i>	205
<i>Figura 6.7 Superficie libre 3D simulada con el modelo MANOLO para los tiempos. $t=0 s$, $t=2 s$, $t=4 s$, $t=6 s$, $t=8 s$, $t=10 s$, $t=12 s$, y $t=14s$.</i>	206
<i>Figura 6.8 Detalle del bajo representado en una malla en elementos finitos y batimetría para el experimento de Berkhoff (1982). Sensores y posición de los perfiles considerados.</i>	207
<i>Figura 6.9 Series temporales de superficie libre simuladas con los modelos numéricos FUNWAVE © (línea continua), y MANOLO (puntos).</i>	210
<i>Figura 6.10 Comparaciones de la altura de ola de los 8 transectos. Datos experimentales (ooo), MANOLO (línea continua).</i>	211
<i>Figura 6.11 Mapa de superficie libre y batimetría del caso Berkhoff et al. (1982) obtenido numéricamente con el modelo MANOLO para $t=40 s$.</i>	213
<i>Figura 6.12 Batimetría propuesta en los experimentos de Whalin (1971).</i>	214

- Figura 6.13 Superficie libre instantánea para $t=40s$, obtenidas con el modelo numérico MANOLO, para los tres periodos, a) $T=1s$, $H=0.039m$, b) $T=2s$, $H=0.015m$, $T=3s$, $H=0.0136m$. 215*
- Figura 6.14 Comparaciones entre las amplitudes de los tres primeros armónicos para la línea central a lo largo del canal, y para los tres periodos, a) $T=1s$, $H=0.039m$, b) $T=2s$, $H=0.015m$, $T=3s$, $H=0.0136m$. Comparados con los datos experimentales Whalin (1971). Datos experimentales: 1er armónico (●●), 2do armónico (--), 3er armónico (xx). Resultados numéricos: Líneas continuas. 216*
- Figura 6.15 Dominio computacional y malla en elementos finitos triangulares para el caso simulado Ippen & Goda (1963). 219*
- Figura 6.16 Respuesta de amplificación para el puerto rectangular Ippen & Goda (1963). Solución lineal Lee (1971), puntos. Solución numérica MANOLO, círculos. 220*
- Figura 6.17 Mapas 2D de superficie libre para el caso Ippen & Goda (1963), simulado con el modelo numérico MANOLO para $kl=1.32$, y los tiempos $t_1=49s$, y $t_2=68s$. 221*
- Figura 6.18 Dominio computacional y malla en elementos finitos triangulares para el caso simulado Rogers & Mei (1978). 224*
- Figura 6.19 Desarrollo de la superficie libre para el caso de Rogers & Mei (1978), modelado numéricamente para diferentes instantes de tiempo. 225*
- Figura 6.20 Registros temporales de superficie libre y espectros de amplitudes obtenidos para 5 puntos localizados a lo largo del canal. Resultados numéricos. 227*
- Figura 6.21 Solución analítica del factor de amplificación para el caso de Rogers & Mei (1978). Obtenido con el modelo propuesto por Liu et al. (2004). 229*
- Figura 6.22 Espectros wavelet para diferentes posiciones del puerto 231*

<i>Figura 6.23 Factor de amplificación (a) en la entrada de la bahía con la bahía cerrada y (b) al final de la bahía con la bahía abierta.</i>	232
<i>Figura 6.24 Variación espacial de las amplitudes a lo largo de la bahía.</i>	233
CAPÍTULO 7	
<i>Figura 7.1 Esquema general del dominio computacional y los elementos que lo conforman.</i>	244
<i>Figura 7.2 Ejemplo de dos MEFs con diferente precisión geométrica $t=20s$; a) Malla para 15 nodos por longitud de onda, b) Malla para 30 nodos por longitud de onda.</i>	246
<i>figura 7.3 Comparación de superficie libre numérico para el caso de utilizar la malla de 15 nodos por longitud de onda (azul) y utilizando 30 nodos por longitud de onda (rojo). Puntos 1 a 6.</i>	249
<i>figura 7.4 Comparación de superficie libre numérico para el caso de utilizar la malla de 15 nodos por longitud de onda (azul) y utilizando 30 nodos por longitud de onda (rojo). Puntos 7 a 12.</i>	250
<i>figura 7.5 Comparación de superficie libre numérico para el caso de utilizar la malla de 15 nodos por longitud de onda (azul) y utilizando 30 nodos por longitud de onda (rojo). Puntos 13 y 16</i>	251
<i>Figura 7.6 Comparaciones de los espectros de amplitud obtenidos para el caso de utilizar una malla con 15 nodos por longitud de onda (azul) y utilizar 30 nodos por longitud de onda (rojo), para 6 puntos dentro del domino (1, 2, 4, 8, 12, y 16).</i>	252
<i>Figura 7.7 Registros temporales de superficie libre de la generación del oleaje, numérico (puntos), y experimental (línea), para diferentes casos simulados y para el sensor 1 (zona de incidencia). a) 0003, b)0102, c)0302, d)0501, e)0902, y f) 1702.</i>	255

- Figura 7.8* Decaimiento de la superficie libre a lo largo de la corona de absorción de energía hacia el exterior, $T=2s$, $h=0.025m$. Superficie libre (línea continua), función de “enfriamiento” Newtoniano (línea y puntos). 257
- Figura 7.9* Registro de superficie libre para el sensor 1 (zona de incidencia), caso 0101 ($T=2s$, $a=0.05m$). a) Sin fricción en el fondo, b) con fricción en el fondo $fw=0.012$. Resultados numéricos (puntos), serie experimental (línea). 260
- Figura 7.10* Registro de superficie libre para el sensor 7 (zona de radiación), caso 0101 ($T=2s$, $a=0.05m$). a) Sin fricción en el fondo, b) con fricción en el fondo $fw=0.012$. Resultados numéricos (puntos), serie experimental (línea). 260
- Figura 7.11* Registro de superficie libre para el sensor 17 (zona de radiación), caso 0101 ($T=2s$, $a=0.05m$). a) Sin fricción en el fondo, b) con fricción en el fondo $fw=0.012$. Resultados numéricos (puntos), serie experimental (línea). 261
- Figura 7.12* Malla en elementos finitos triangulares diseñada para las simulaciones con la geometría 01. 263
- Figura 7.13* Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$; $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6. 267
- Figura 7.14* Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 7 a 12. 268
- Figura 7.15* Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 16 a 18. 269
- Figura 7.16* Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 0202. 270

- Figura 7.17 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0303, $H=0.05m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.0123$; $\delta = 0.1$. Sensores 1 a 6.* 274
- Figura 7.18 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0303, $H=0.05m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.0123$; $\delta = 0.1$. Sensores 7 a 12.* 275
- Figura 7.19 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0303, $H=0.05m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.0123$; $\delta = 0.1$. Sensores 16 a 18.* 276
- Figura 7.20 Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules)) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 0303.* 277
- Figura 7.21 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1302, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6.* 280
- Figura 7.22 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1302, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 7 a 12.* 281
- Figura 7.23 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0302, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 13 a 18.* 282
- Figura 7.24 Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules)) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 1302.* 283
- Figura 7.25 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6.* 287
- Figura 7.26 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$.* 288

- $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 7 a 12.
- Figura 7.27 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 15 a 18. 289
- Figura 7.28 Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 1702. 292
- Figura 7.29 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6. 295
- Figura 7.30 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 7 a 12. 296
- Figura 7.31 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 15 a 18. 297
- Figura 7.32 Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 1202. 300
- Figura 7.33 Comparación de los registros temporales de superficie de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del los casos a) 0103 $H=0.01m$, b) 0102 $H=0.025m$ y c) 0101 $H=0.05m$, $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1). 303
- Figura 7.34 Comparación de los espectros wavelets y los espectros de amplitudes para los datos numéricos, del los casos a) 0103 $H=0.01m$, b) 0102 $H=0.025m$ y c) 0101 $H=0.05m$, $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1). 305
- Figura 7.35 Comparación de los registros temporales de superficie de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del los casos a) 0102 $H=0.025m$, b) 0302 $H=0.025m$ y c) 0501 307

- $H=0.025m$, $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1).
- Figura 7.36 Comparación de los espectros wavelets y los espectros de amplitudes para los datos numéricos, del los casos a) 0102 $H=0.025m$, b) 0302 $H=0.025m$ y c) 0501 $H=0.025m$, $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1). 308
- Figura 7.37 Evolución espacial de los primeros cuatro armónicos dentro del puerto para el caso 0501. 309
- Figura 7.38 Superficie libre para un puerto trabajando en solitario con 5 diferentes longitudes 5m, 4m, 3m, 2m y 1 m, para diferentes instantes de tiempo, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. 311
- Figura 7.39 Comparación de los registros temporales de superficie de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del los casos a) 1701 $H=0.01m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 1703 $H=0.05m$, $h=0.5m$. Sensores 15 (al final del canal portuario 2), y 18 (al final del canal portuario 1). 313
- Figura 7.40 Comparación de los espectros wavelets y espectros de amplitudes para los datos numéricos, del los casos a) 1701 $H=0.01m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 1703 $H=0.05m$, $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1). 313
- Figura 7.41 Comparación de los espectros wavelets y espectros de amplitudes para los datos numéricos, del los casos a) 1701 $H=0.01m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 1703 $H=0.05m$, $h=0.5m$. Sensor 15 (al final del canal portuario 2). 314
- Figura 7.42 Comparación de los registros temporales de superficie de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del los casos a) 2502 $H=0.025m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 0902 $H=0.025m$, $h=0.5m$. Sensores 15 (al final del canal portuario 2), y 18 (al final del canal portuario 1). 317
- Figura 7.43 Comparación de los espectros wavelets y espectros de amplitudes para los datos numéricos, casos a) 2502 $H=0.025m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 0902 $H=0.025m$, $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1). 318

<i>canal portuario 1).</i>	
<i>Figura 7.44 Comparación de los espectros wavelets y espectros de amplitudes para los datos numéricos, casos a) 2502 $H=0.025m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 0902 $H=0.025m$, $h=0.5m$. Sensor 15 (al final del canal portuario 2).</i>	319
<i>Figura 7.45 Evolución espacial de los primeros cuatro armónicos dentro del primer puerto para el caso 1701.</i>	321
<i>Figura 7.46 Evolución espacial de los primeros cuatro armónicos dentro del segundo puerto para el caso 1701.</i>	321
<i>Figura 7.47 Superficie libre para un puerto resonante de 5m y sus correspondientes puertos acoplados de 4m, 3m, 2m y 1 m, para diferentes instantes de tiempo, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$.</i>	322
<i>Figura 7.48 Malla en elementos finitos triangulares para el caso 1702 sin paredes del canal de oleaje experimental.</i>	325
<i>Figura 7.49 Comparación de los datos numéricos para el caso con paredes (puntos azules) vs. datos numéricos para el caso con paredes (línea continua roja), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 4 a 6.</i>	326
<i>Figura 7.50 Comparación de los datos numéricos para el caso con paredes (puntos azules) vs. datos numéricos para el caso con paredes (línea continua roja), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 7 a 13.</i>	327
<i>Figura 7.51 Comparación de los datos numéricos para el caso con paredes (puntos azules) vs. datos numéricos para el caso con paredes (línea continua roja), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 13 a 18.</i>	328
<i>Figura 7.52 Comparación de los datos numéricos sin paredes laterales (puntos azules) vs. datos numéricos sin paredes laterales (línea continua), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6.</i>	331

<i>Figura 7.53a Velocidad U promediada en fase, caso 0202.</i>	333
<i>Figura 7.53b Velocidad V promediada en fase, caso 0202.</i>	334
<i>Figura 7.54a Velocidad U promediada en fase, caso 1702.</i>	336
<i>Figura 7.54b Velocidad V promediada en fase, caso 1702.</i>	337
<i>Figura 7.55a Velocidad U promediada en fase, caso 1002.</i>	340
<i>Figura 7.55b Velocidad V promediada en fase, caso 1002.</i>	341
<i>Figura 7.56 Vectores de velocidad en la superficie libre para el caso 0202 en diferentes instantes de tiempo en el plano x-y.</i>	343
<i>Figura 7.57 Vectores de velocidad en la superficie libre para el caso 1702 en diferentes instantes de tiempo en el plano x-y.</i>	343
<i>Figura 7.58 Vectores de velocidad en la superficie libre para el caso 1002 en diferentes instantes de tiempo en el plano x-y.</i>	344

CAPÍTULO 8

<i>Figura 8.1 Fotografía del puerto de Ciutadella. Aeroguía del Litoral, Menorca.</i>	354
<i>Figura 8.2 Carta náutica 6A, sección occidental de la costa Menorquina. Instituto Hidrográfico de la Marina.</i>	355
<i>Figura 8.3 Disposición de los sensores de presión, campaña LAST-97.</i>	357
<i>Figura 8.4 Registros completos de superficie libre para los siete sensores utilizados en la campaña LAST-97.</i>	358
<i>Figura 8.5 Factores de amplificación para dos bocanas acopladas, a) bocana 1 (Ciutadella) y b) bocana 2 (Platja Gran).</i>	363
<i>Figura 8.6 Factores de amplificación para las bocanas 1 y 2, medidos en la campaña LAST-97. a) Ciutadella (bocana 1), b) Platja Gran (Bocana 2).</i>	364
<i>Figura 8.7 a) Malla en elementos finitos para el modelo MSP, b) Coeficientes</i>	366

<i>de amplificación para Ciutadella y Platja Gran.</i>	
<i>Figura 8.8 Eventos seleccionado para la realización de las simulaciones.</i>	371
<i>Figura 8.9 Series medidas en MW1 y M2 para el registro de rissaga, a) Serie intacta, b) serie con marea filtrada.</i>	374
<i>Figura 8.9 Reconstrucción analítica de la serie medida MW1, caso rissaga.</i>	376
<i>Figura 8.10 Espectros de energía del sensor MW4 para los registros correspondientes a los casos, a)energía alta (rissaga), b) Energía intermedia, y c) Energía baja. La escalas verticales son relativas a los máximos de cada espectro.</i>	379
<i>Figura 8.11 Representación del volumen Gaussiano utilizado como fuente de generación del oleaje dentro del dominio computacional.</i>	380
<i>Figura 8.12 Esquema del dominio numérico, esponja absorbente y área de generación para las simulaciones del puerto de Ciutadella y Platja Gran.</i>	382
<i>Figura 8.12a Dominio computacional y malla de elementos finitos Utilizado en las simulaciones numéricas.</i>	383
<i>Figura 8.12b Detalle del dominio computacional y malla en elementos finitos con cotas batimétricas para el puerto de Ciutadella y Platja Gran.</i>	383
<i>Figura 8.13 Series temporales de oleaje irregular modelado (azul) y medido (negro) para el caso rissaga, en los sensores situados en la zona al exterior de las calas.</i>	386
<i>Figura 8.14 Series temporales de oleaje irregular modelado (azul) y medido (negro) para el caso rissaga, en los sensores situados en el interior de las calas de Ciutadella y Platja Gran.</i>	387
<i>Figura 8.15 Registros temporales de superficie libre para el caso rissaga (sensores MW1, MW2, MW3 y MW4). Datos medidos (rojo), resultados numéricos (azul).</i>	389
<i>Figura 8.16 Registros temporales de superficie libre para el caso de energía rissaga (sensores M1, M0 y M2). Datos medidos (rojo), resultados numéricos (azul).</i>	390

<i>Figura 8.17 Comparación de los espectros de energía. Caso Rissaga. Sensores: a) MW1, b) MW2, c) MW3, d) MW4, e) M1, f) M0, g) M2, medido (línea roja), modelado(línea y punto azul).</i>	393
<i>Figura 8.18 Comparación de los espectros de energía. Caso de energía Intermedia. Sensores: a) MW1, b) MW2, c) MW3, d) MW4, e) M1, f) M0, g) M2, medido (línea roja), modelado(línea y punto azul).</i>	394
<i>Figura 8.19 Comparación de los espectros de energía. Caso de energía baja. Sensores: a) MW1, b) MW2, c) MW3, d) MW4, e) M1, f) M0, g) M2, medido (línea roja), modelado(línea y punto azul).</i>	395
<i>Figura 8.20 Coeficiente de amplificación relativa en Ciutadella y Platja Gran para los tres casos simulados; a) caso rissaga, b) caso energía intermedia, c) caso energía baja. Numérico (puntos), medido (línea).</i>	402
<i>figura 8.21 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor MW4. Caso rissaga. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.</i>	405
<i>Figura 8.22 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M1. Caso rissaga. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.</i>	406
<i>Figura 8.23 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M2. Caso rissaga. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.</i>	407
<i>Figura 8.24 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor MW4. Caso energía intermedia. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.</i>	411
<i>Figura 8.25 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M1. Caso energía intermedia. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.</i>	412
<i>Figura 8.26 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M2. Caso energía intermedia. Serie medida (rojo), serie simulada</i>	413

(azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

<i>Figura 8.27</i>	<i>Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor MW4. Caso energía baja. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.</i>	414
<i>Figura 8.28</i>	<i>Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M1. Caso energía baja. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.</i>	415
<i>Figura 8.29</i>	<i>Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M2. Caso energía baja. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.</i>	416

ANEXO I

<i>Figura I.1</i>	<i>Localización de las dársenas de estudio y dimensiones aproximadas del puerto de Lastres.</i>	536
<i>Figura I.2</i>	<i>Malla en elementos finitos, batimetría y sensores empleados en la simulación MSP.</i>	538
<i>Figura I.3</i>	<i>Coefficientes de amplificación para las dársenas 1 y 2 del puerto de Lastres.</i>	539
<i>Figura I.4</i>	<i>Patrones de oscilación para los seis diferentes periodos resonantes para las dársenas 1 y 2 del puerto de Lastres.</i>	541
<i>Figura I.5</i>	<i>Correlación de altura de ola y periodo en temporales para registros instrumentales, tomado de ROM 0.3-91</i>	543
<i>Figura I.6</i>	<i>Espectros JONSWAP diseñados</i>	544
<i>Figura I.7.</i>	<i>Espectros de amplitudes JONSWAP + onda larga, para la primera dársena, diseñados para el primer y segundo modo resonante.</i>	547
<i>Figura I.8.</i>	<i>Espectros de amplitudes JONSWAP + onda larga, para la segunda dársena, diseñados para el primer y segundo modo resonante.</i>	548

<i>Figura I.9 Registros temporales de superficie libre de la campaña de Lastres, para 20/02/02; 15:00 horas.</i>	550
<i>Figura I.10 Diseño del dominio numérico, para las simulaciones del puerto de Lastres con el modelo MANOLO.</i>	552
<i>Figura I.11 Localización de Sensores numéricos, batimetría, y malla en elementos finitos triangulares, diseñada para las simulaciones del puerto de Lastres con el modelo MANOLO.</i>	553
<i>Figura I.12 Comparación de los espectros de energía, para el caso de validación del puerto de Lastres con el modelo MANOLO para 20/02/02; 15:00 horas. Escalas verticales variables.</i>	556
<i>Figura I.13 Vectores horizontales de velocidad en la superficie libre U V, para el instante $t=115$ s.</i>	557
<i>Figura I.14 Series temporales de superficie libre, velocidades U-V, y presión en el fondo para el punto P1.</i>	558
<i>Figura I.15 Registros temporales de superficie libre obtenidos numéricamente, caso de espectro JOSNWAP + energía de onda larga de $T=120$s.</i>	560
<i>Figura I.16 Espectros de amplitudes para el caso JONSWAP + onda larga $T=120$ s.</i>	562
<i>Figura I.17 Espectros wavelet para los puntos a)P1,b) P6 y c)P7 resultado de la simulación JONSWAP + onda larga $T=120$ s, con el modelo MANOLO.</i>	564
<i>Figura I.18 Coeficiente de amplificación para la dársena 1, punto P6.</i>	566
<i>Figura I.19 Coeficiente de amplificación para la dársena 2, punto P7.</i>	567
<i>Figura I.20 Representaciones 3D del caso JONSWAP + onda larga 120 s, a cada 50 s. Realizado con el modelo manolo.</i>	568

LISTA DE TABLAS**CAPÍTULO 1**

<i>Tabla 1.1 Resumen de metodologías numéricas para el estudio de la resonancia en puertos.</i>	22
---	----

CAPÍTULO 2

<i>Tabla 2.1 Funciones y metodologías utilizadas para caracterizar el agrupamiento del oleaje.</i>	36
--	----

CAPÍTULO 4

<i>Tabla 4.1. Ternas de coeficientes en los ajustes encontrados en la bibliografía.</i>	87
<i>Tabla 4.2. Características generales de los sistemas utilizados en la campaña de Lastres.</i>	94
<i>Tabla 4.3 Ternas de coeficientes en los ajustes propuestos en este capítulo.</i>	123

CAPÍTULO 5

<i>Tabla 5.1a Organización de los ensayos correspondientes al primer grupo incluyendo sus valores característicos.1 a 16.</i>	144
<i>Tabla 5.1b Organización de los ensayos correspondientes al primer grupo incluyendo sus valores característicos.17 a 25.</i>	145
<i>Tabla 5.2a. Organización de los ensayos correspondientes al grupo de ensayos complementarios, incluyendo sus valores característicos. 1 a 6.</i>	146

Tabla 5.2b. Organización de los ensayos correspondientes al grupo de ensayos complementarios, incluyendo sus valores característicos. 7 a 16. 147

Tabla 5.2b. Organización de los ensayos correspondientes al grupo de ensayos complementarios, incluyendo sus valores característicos. 17 a 26. 148

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1 Valores geométricos y de oleaje incidente para los tres casos simulados. 215

CAPÍTULO 7

Tabla 7.1 Número de nodos y elementos de la malla en elementos finitos utilizada en cada simulación numérica de los casos de laboratorio con el modelo numérico MANOLO. 262

CAPÍTULO 8

Tabla 8.1 Localización de los sensores y sus calados. 358

Tabla 8.2 Error medio de energía espectral para las bandas de frecuencia en cada punto de control. Caso rissaga. 397

Tabla 8.3 Error medio de energía espectral para las bandas de frecuencia en cada punto de control. Caso energía intermedia. 398

Tabla 8.4 Error medio de energía espectral para las bandas de frecuencia en cada punto de control. Caso energía baja. 399

ANEXO I

<i>Tabla I.1 Relaciones empíricas de altura de ola significativa, periodo de pico y periodo medio para los valores de altura de ola y periodo visuales.</i>	468
<i>Tabla I.2 Coeficientes en los ajustes propuestos en la literatura</i>	488
<i>Tabla I.3 Resumen de los estudios en puertos, objetivos, análisis, datos de entrada, fuentes de datos, y modelo numérico a utilizar.</i>	491
<i>Tabla I.4 Relación general de modelos numéricos utilizados en estudios portuarios, datos de entrada y salida, y objetivos que cubren.</i>	503
<i>Tabla I.5 Respuesta resonante para dársenas idealizadas con geometrías simples, Zelt (1986).</i>	507
<i>Tabla I.6 Valores típicos de escala para modelación física en puertos, Coastal Engineering Manual (2003) Vol. 5.</i>	527

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 2

Fr	Fuerza de rozamiento viscoso
H	Altura de ola
H	Profundidad
K	Número de onda
L	Longitud de onda
$L0$	Longitud de onda en aguas profundas
T	Periodo de onda
\bar{U}	Velocidad promediada en vertical
ε	Peralte de onda
μ	Profundidad relativa
η	Superficie libre
π	Número Pi

CAPÍTULO 4

H	Altura de ola
α	Parámetro empírico
β	Parámetro empírico
C	Celeridad de onda
E	Energía total
f	Frecuencia
g	Aceleración de la gravedad
$g(t)$	Función basada en la integral de escala temporal
h	Profundidad
k	Número de onda
K	Parámetro de ajuste del ajuste empírico
$m0$	Momento de orden cero
m_n	Momento de orden n
p	Presión

LISTA DE SÍMBOLOS

$S(f)$	Densidad de energía espectral
u	Velocidad en la dirección x
v	Velocidad en la dirección y
w	Velocidad en la dirección z
ω_0	Frecuencia básica
$X(t)$	Señal temporal cualquiera
ρ	Densidad del agua
ϕ	Potencial de velocidades
η	Superficie libre
ν^2	Anchura espectral
γ	Parámetro de apuntamiento del espectro JONSWAP
H_s^*	Altura de ola significativa para onda larga
H_s	Altura de ola significativa para onda corta
T_p	Periodo de pico para onda corta
T_p^*	Periodo de pico para onda larga
$\hat{X}(\omega)$	Transformada de Fourier
$\psi_{a,b}$	Función madre wavelet
C_ψ	Función de admisibilidad
$\hat{\psi}(t)$	Función de continuidad y diferenciabilidad
$W_X(s, \tau)$	Espectro wavelet

CAPÍTULO 5

δ	Altura relativa de la onda
$f1$	Frecuencia del primer armónico
$f2$	Frecuencia del segundo armónico
$f3$	Frecuencia del tercer armónico
$f4$	Frecuencia del cuarto armónico
H	Altura de ola
h	Profundidad
k	Número de onda
L	Longitud de onda
l	Longitud del canal
n	Modo de oscilación

T	Periodo de onda
$T1/3$	Periodo significativa
tf	Tiempo final
ti	Tiempo inicial
Tz	Periodo medio
Ur	Número de Ursell
x	Dirección horizontal a lo largo del flujo
y	Dirección horizontal perpendicular al flujo
z	Dirección vertical
η_i	Superficie libre incidente
η_r	Superficie libre reflejada
η	Superficie libre
ω	Frecuencia angular
ε	Peralte de onda
μ	Profundidad relativa

CAPÍTULO 6

a_o	Amplitud característica de la onda
δ	Altura relativa de la onda
b_o	Constante de amplitud
Γ_w	Contorno de la pared
Γ_w^E	Pared impermeable situada al final de la capa tipo esponja
θ	Ángulo entre la dirección de propagación de la onda y el eje x
λ	Longitud de onda para definir la generación
u_α	Velocidad horizontal en la profundidad z_α
x_w^s	Coordenada x de la posición central de la región fuente
n, T	Coordenadas locales en el contorno
Un, UT	Velocidades horizontales en las coordenadas locales del contorno
a	Amplitud de onda
C	Celeridad de onda
C	Celeridad de fase
Ce	Coefficiente de Chezy

LISTA DE SÍMBOLOS

Cg	Celeridad de grupo
D	Magnitud de la función fuente
fw	Coefficiente de fricción por fondo
g	Aceleración de la gravedad
h	Profundidad
I	Constante de integración
k	Número de onda
l	Longitud del canal portuario (Ippen & Goda, 1963)
n	Vector normal al contorno
n	Nodos del dominio numérico
ND	Número total de nodos en el dominio
u	Componente horizontal del campo de velocidades
Ur	Número de Ursell
W	Función de ponderación de Galerkin
wc	Ancho del canal portuario (Ippen & Goda, 1963)
w	Componente vertical del campo de velocidades
x	Dirección horizontal a lo largo del flujo
y	Dirección horizontal perpendicular al flujo
z	Dirección vertical
l_o	Longitud de onda característica
h_o	Profundidad característica
η	Superficie libre adimensional
Φ	Potencial de velocidades
ε	Peralte de onda
μ	Profundidad relativa
∇	Gradiente horizontal
\bar{u}	Velocidad integrada en vertical
α	Factor de ajuste de Nwogu (1993)
z_α	Profundidad a una distancia $z = \alpha h$
ω	Frecuencia angular
β	Constante de forma de Nwogu (1993)
Ω	Dominio espacial
Γ	Contorno
ψ	Función de forma
δ_{ij}	Función delta de Dirac

π	Número Pi
θ	Ángulo referente al contorno
Γ^s	Posición inicial de la capa tipo esponja absorbente
t_0	Escala temporal característica
S_η	Factor de esponja referente a la velocidad horizontal v
S_u	Factor de esponja referente a la superficie libre
S_v	Factor de esponja referente a la velocidad horizontal u
C_η, C_{U1}, C_{U2}	Coefficientes de amortiguación de la esponja
γ	Parámetro asociado a la función fuente
$F_w^\eta(x, y, t)$	Combinación lineal de funciones de forma y de valores nodales
u_b	Vector de velocidad en el fondo
ν_b	Viscosidad de remolino para rotura
V_T	Modelo de submalla tipo Smagorinsky (1963)
Δt	Incremento de tiempo

CAPÍTULO 7

W	Anchura del canal numérico
l_n	Longitud del canal numérico
a	Amplitud de onda
Ce	Coefficiente de Chezy
$f1$	Frecuencia del primer armónico
$f2$	Frecuencia del segundo armónico
$f3$	Frecuencia del tercer armónico
$f4$	Frecuencia del cuarto armónico
$fmax$	Frecuencia máxima de aplicación de las ecuaciones
fw	Coefficiente de fricción por fondo
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura de ola
h	Profundidad
h	Profundidad
k	Número de onda
L	Longitud de onda

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Periodo de onda
T_{lim}	Periodo mínimo de aplicación de las ecuaciones
U	Velocidad en la dirección x
V	Velocidad en la dirección y
x	Dirección horizontal a lo largo del flujo
y	Dirección horizontal perpendicular al flujo
z	Dirección vertical
η_i	Superficie libre incidente
η_r	Superficie libre reflejada
η	Superficie libre
ω	Frecuencia angular
Δt	Incremento de tiempo
z_α	Profundidad a una distancia $z = \alpha h$

CAPÍTULO 8

A	Coefficiente de amplificación espectral
bi	Fase de cada armónico
C_e	Coefficiente de Chezy
D_{90}	Tamaño de grano
D_{mi}	Dato medido
D_{ni}	Dato numérico
f	Frecuencia del primer armónico
ff	Frecuencia final
fi	Frecuencia inicial
f_{min}	Frecuencia mínima
fw	Coefficiente de fricción por fondo
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura de ola
h	Profundidad
h_m	Profundidad de la cala de Ciutadella
II	Factor de forma de la fuente
k	Número de onda
ki	Número de onda de cada armónico

L_g	Longitud de la zona de generación
L_m	Longitud de la cala de Ciutadella
N	Número de puntos a comparar
$SfM1,2$	Densidad espectral para las bocanas
$SfMW4$	Densidad espectral para la zona exterior
T	Periodo de onda
tf	Tiempo final
ti	Tiempo inicial
W	Ancho de la zona de generación
wm	Anchura de la cala de Ciutadella
X, Y	Coordenadas del dominio en UTM
α, α_1	Tipo de aproximación de las ecuaciones de Boussinesq
η_i	Amplitud de cada armónico
ω_i	Frecuencia angular de cada armónico
δ	Constante de la zona de generación

ANEXO I

α	Parámetro empírico
Ar	Área de escala
β	Parámetro empírico
Ce	Coefficiente de Chezy
C	Celeridad de fase
Cg	Celeridad de grupo
D_{90}	Tamaño de grano representativo
Δt	Incremento de tiempo mínimo
Δx	Longitud mínima del elemento en toda la malla numérica
δ	Parámetro que define el ancho de la zona de generación
b/l	Anchura relativa de las dársenas
ε	Peralte de onda
F	Unidad de fuerza
Fr	Fuerza de escala
FLi	Barrido de frecuencias de onda larga
f	Frecuencia

LISTA DE SÍMBOLOS

f_w	Coeficiente de fricción por fondo de Darcy
γ	Factor de ensanchamiento de pico espectral
g	Aceleración de la gravedad
H_s^*	Altura de ola significativa para onda larga
H_s	Altura de ola significativa para onda corta
H_v	Altura de ola visual
H	Altura de ola
h	Profundidad
$[J_{m,n}^{-1}]$	Función de transferencia representativa de la región marítima donde se ubica la obra
K	Parámetro de ajuste
K_{Amp}	Coeficiente de amplificación
k	Número de onda
ζ_{ID}	Valor de la amplitud del set-down
l	Longitud mayor del rectángulo
L	Unidad de longitud
L^2	Unidad de área
L^3	Unidad de volumen
L/T	Unidad de velocidad
$L/6$	Unidad de rugosidad
L^3/T	Unidad de descarga
Lr	Longitud de escala
μ	Profundidad relativa
mn	Momento de orden n
nr	Coeficiente de fricción n de Manning de escala
nm	Coeficiente de fricción n de Manning
$\sqrt{m_0^*}$	Energía de onda larga de set-down asociada a los grupos de onda corta
n	Modos de oscilación
Qr	Caudal de escala
$S_{exterior}$	Espectro de energía en el exterior
$S_{interior}$	Espectro de energía en el interior
$\sigma\theta$	Parámetro de dispersión angular espectral
S	Superficie de la dársena
T_0	Periodo de oscilación fundamental
T_p	Periodo de pico para onda corta

T_p^*	Periodo de pico para onda larga
T_n	Periodo de oscilación del cuerpo de agua
Tr	Periodo de escala
Tv	Periodo de onda visual
T	Unidad de tiempo
θm	Dirección media
v_2	Anchura espectral de Longuet-Higgins
Vr	Velocidad de escala
V_{max}	Velocidad máxima en cada nodo
∇_r	Volumen de escala
w	Anchura media de la dársena
w/l	Anchura relativa de las bocanas
W	Ancho de la zona de generación
x	Dirección horizontal a lo largo del flujo
y	Dirección horizontal perpendicular al flujo
z	Dirección vertical

