

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

ANEXO I
METODOLOGÍA DE TRABAJO Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA
EL ESTUDIO DE AGITACIÓN Y RESONANCIA PORTUARIA

I.1 INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la ingeniería de costas y portuaria se ha enfrentado al estudio de los procesos de agitación y resonancia portuaria a través del uso de técnicas analíticas simples, y modelos numéricos lineales y no transitorios, que únicamente son capaces de simular, de forma aislada, algunos de los procesos asociados a la agitación y resonancia portuaria, obteniendo así valores de agitación, coeficientes de amplificación, y patrones de oscilación en las dársenas, que en algunas circunstancias pueden ser poco realistas.

Dichos estudios carecen de un enfoque integral, y se plantean bajo fuertes hipótesis simplificativas que en ocasiones hacen que los resultados obtenidos presenten importantes limitaciones de aplicabilidad para situaciones de agitación portuaria reales.

Sin embargo, se cuenta en la actualidad con nuevas técnicas destinadas a procesar los datos medidos en campo; a analizar las energías y frecuencias de las series temporales de superficie libre, y a aplicar modelos no lineales y transitorios sobre configuraciones portuarias complejas, que en conjunto son capaces de generar una importante información espacial y temporal de gran calidad, destinada a mejorar considerablemente los estudios de agitación y resonancia en puertos.

Hoy en día, las técnicas diseñadas para la adquisición de datos en campo, para el análisis de series temporales de superficie libre, y para la realización de simulaciones numéricas, deben plantearse bajo una filosofía de trabajo integrado, que las conciba como una herramienta de trabajo única, con el objetivo fundamental de que el especialista sea capaz de realizar estudios de agitación y resonancia portuaria, con mayor eficiencia y fiabilidad.

a) Objetivo

El objetivo de este documento es plantear una nueva metodología integrada para llevar a cabo estudios de agitación y resonancia portuaria. Además, se incluyen una serie de recomendaciones, que faciliten el planteamiento e implementación de cualquier estudio numérico de agitación y resonancia portuaria que se desee realizar.

b) Usuarios y sus requerimientos

Esta metodología está orientada a ingenieros y técnicos del ámbito costero, con conocimientos sólidos en los campos de la hidrodinámica marina, modelos y técnicas de simulación numérica en el ámbito portuario y costero, y en el tratamiento de series de datos.

c) Alcance del documento

En este capítulo se presenta un resumen de la metodología antes citada, y las recomendaciones mencionadas, con la finalidad de ofrecer una guía en cuanto a:

- Recolección de datos de partida, incluyendo su preproceso y utilización.
- Establecimiento de la escalas temporales y espaciales que se deben analizar en cada problema.
- La aplicación de las herramientas e integración de las mismas.
- El tipo de resultados y su post-proceso, adecuándolos a las diferentes disciplinas involucradas en un estudio portuario, tanto técnicos (ingenieros, biólogos, ambientalistas, etc.), como de gestión.

Este capítulo se organiza siguiendo la estructura anterior. En primer lugar, se presenta un resumen de los datos de partida necesarios para la realización de cualquier estudio de agitación y resonancia portuaria: la elección de la zona de estudio; los datos batimétricos; los datos hidrodinámicos y las fuentes de datos existentes.

En segundo lugar, se presenta un resumen de las técnicas existentes en la actualidad, para la caracterización de los elementos forzadores que actúan sobre los puertos; el estudio de los valores característicos de los grupos de ondas y la determinación empírica de los parámetros de onda larga a partir de registros de onda corta obtenidos en el campo.

En tercer lugar, se presenta un procedimiento para evaluar los efectos de la agitación y resonancia portuaria mediante la aplicación de modelos numéricos. El procedimiento se inicia con la caracterización de los elementos a ser simulados, siguiendo con una evaluación analítica de los periodos de oscilación para dársenas con geometrías sencillas y terminando con la aplicación y combinación de los modelos numéricos lineales tales como el modelo OLUCA, el modelo MSP y no lineales, como el modelo MANOLO. En esta sección se proponen recomendaciones y técnicas de aplicación para modelar el dominio numérico, el tratamiento de la batimetría, los elementos forzadores, las condiciones de contorno, y los rangos de aplicación de los distintos modelos.

En cuarto lugar, se presenta un resumen del tratamiento de los resultados obtenidos a partir del estudio numérico: el tipo de datos de salida, sus diferentes interpretaciones y sus diversas aplicaciones para diferentes objetivos.

Para finalizar, se presenta un ejemplo de aplicación de la metodología descrita, llevando a cabo un estudio de resonancia portuaria en el puerto de Lastres.

I.2 DATOS DE PARTIDA

Cualquier estudio o proyecto relacionado con la construcción, diseño, ampliación, mejora, operación, mantenimiento, y optimización de instalaciones portuarias requiere una serie de datos de partida que se pueden recopilar a partir de diversas fuentes.

Este primer apartado se encarga de describir, de manera breve, las fuentes de información que el técnico requiere como punto de partida de un estudio de agitación y resonancia en instalaciones portuarias.

De manera general, los datos de partida de cualquier estudio de estas características, se pueden dividir en dos grandes grupos. El primero corresponde a los datos topográficos y batimétricos de la zona de estudio, y a las recomendaciones necesarias para delimitar y obtener estos datos en campañas de campo. El segundo grupo corresponde a las bases de datos históricas que ofrecen información de oleaje y nivel del mar, a partir de series medidas o simuladas numéricamente.

I.2.1 Datos topo-batimétricos

Definir adecuadamente la zona de estudio con el fin de establecer el contorno batimétrico y los límites de influencia del clima marítimo de la zona de interés, es de vital importancia.

El diseño de cualquier estudio destinado al análisis de las oscilaciones de corto y largo periodo, y efectos resonantes en puertos, requiere que las dimensiones y límites físicos de la zona de estudio sean lo suficientemente amplios para que las longitudes de onda consideradas queden bien representadas.

Por otro lado, se requiere una batimetría de alta resolución en la zona del puerto y sus cercanías, que recoja los detalles de variación del fondo marino tanto en la zona de aproximación al puerto, como dentro del mismo. La calidad de la batimetría es esencial en la fiabilidad del estudio.

El primer paso para la selección de la zona de estudio es la selección de una cartografía a una escala apropiada, considerándose que las cartas náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina a escala 1:50,000 son adecuadas para ésta tarea, y para el establecimiento de los vértices geodésicos y sus coordenadas para la posterior proyección de la línea base en la cual se apoyarán el resto de trabajos.

Respecto a la batimetría de detalle en campo, se recomienda la utilización de tecnología GPS (*Global Position System*) con obtención de datos en tiempo real con precisión de ± 3 cm en las coordenadas *xyz*, para realizar los trabajos de establecimiento y medición de la línea base; enlace con la Red Geodésica Nacional; control de la cota de la superficie del agua; levantamiento batimétrico y el levantamiento taquimétrico de las zonas secas aledañas a los puertos (diques, muros, playas, etc.).

El establecimiento y medición de la línea base permite geo-referenciar la zona de estudio, enlazar sus coordenadas con la Red Geodésica Nacional, y transformar sus valores en coordenadas UTM a fin de homogeneizar las unidades dimensiones de la zona de estudio.

La cota del plano definido por la superficie del agua se controla con un mareógrafo que debe de ser instalado durante toda la campaña batimétrica, y referenciado al nivel cero de las cartas náuticas locales.

Una adecuada batimetría de la zona de estudio es aquella que cuenta con perfiles, por lo menos, cada 25 m en la zona exterior del puerto, sobre una extensión que represente adecuadamente las longitudes de onda involucradas en el estudio.

Como una primera aproximación práctica, dicha extensión representativa se puede determinar directamente del periodo de onda larga obtenido a través la relación lineal propuesta por Lara *et al.* (2002) y Martin *et al.* (2003), que relaciona el periodo de pico de onda larga, con un periodo de pico de onda corta conocido *a priori*. Se recomienda tomar al menos 1.5 veces la longitud de onda larga obtenida a partir del periodo de pico de la onda larga en la zona de estudio.

Son diversas las fuentes para determinar el periodo de pico de onda corta que se utiliza para determinar las dimensiones representativas del dominio de estudio. Se puede obtener directamente de campañas de campo, o bien de registros históricos de boyas instrumentales, bases de datos existentes (por ejemplo, HIPOCAS), o de las Recomendaciones de Obras Marítimas ROM 0.3-91.

Adicionalmente, los datos batimétricos se deben complementar con una malla de detalle, realizada con perfiles cada 10 m dentro de las dársenas portuarias y en la zona exterior adyacente a los puertos. La resolución final de la batimetría depende de las variaciones locales del fondo marino tanto exterior como interior.

Finalmente, se recomienda contar con levantamientos taquimétricos de las zonas secas aledañas a las dársenas e instalaciones portuarias, apoyado por un reportaje fotográfico a lo largo de la zona de interés, y fotografías en planta. Esto con el fin de definir más adelante las características físicas de los contornos de interés del dominio, y prever la posible variabilidad de los resultados en función de las posibles condiciones de secado-inundación.

I.2.2 Fuentes de oleaje

En general, existen tres tipos de fuentes de datos de las cuales se puede obtener la información de oleaje requerida para el estudio: datos visuales provenientes de las observaciones en barcos de ruta; datos medidos en boyas y datos generados numéricamente utilizando técnicas de reanálisis.

a) Datos visuales

El Ente Público Puertos del Estado (EPPE), cuenta con una base de datos visuales, proporcionadas por el *National Climatic Data Center, USA* NCDC. Estos datos son tomados por observadores entrenados desde barcos en ruta.

Adicionalmente, los datos de oleaje visual en la zona Atlántica europea son recopilados por el *British Meteorological Office* BMO; base de datos adquirida en 1984 por el programa de Clima Marítimo del Ministerio de Fomento, hoy en día Área de Análisis del Medio Físico y Tecnología de las Infraestructuras del EPPE. Estos datos se extienden sobre una malla espacial de 1° de lado, con series de datos de larga duración que comprenden periodos de aproximadamente 24 años, conteniendo la siguiente información:

- Fecha y hora de la observación
- Longitud y latitud de la posición del barco
- Altura visual del oleaje de viento
- Periodo visual del oleaje de viento
- Dirección del viento (se considera que el oleaje de viento conserva la misma dirección)
- Altura visual del oleaje de fondo
- Periodo visual del oleaje de fondo
- Dirección visual del oleaje de fondo

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de utilizar los datos visuales de oleaje, es la posible relación que éstos guardan con los datos de altura de ola medidos con instrumentos, existiendo actualmente diversas relaciones empíricas que correlacionan la altura de ola visual H_v , periodos visuales T_v , con una altura de ola significativa H_s , y periodo de pico T_p y periodo medio T_z , respectivamente, para diferentes registros visuales obtenidos en diferentes lugares del mundo, mostradas en la tabla I.1.

Autores	Relaciones empíricas
Hogben & Lumb (1967)	$H_s = 2.55 + 0.66H_v$
Jardine (1979)	$H_s = 1.02 + 0.77H_v$
PCM (1991)	$H_s = 0.54 + 0.59H_v$
GIOC (1993)	$H_s = 0.5 + 0.6H_v$
Hogben & Lumb (1967)	$T_z = 4.7 + 0.32T_v$
Hogben & Lumb (1967)	$T_p = 4.1 + 0.76T_v$
Soares (1986)	$T_z = 6.81 + 0.064T_v$
Soares (1986)	$T_p = 9.1 + 0.152T_v$

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.

Por otro lado, para la aplicación a proyectos de agitación y resonancia portuaria, se puede considerar que los oleajes de viento y los oleajes de fondo actúan como una sola componente, de manera que cada observación se limita a una altura de ola, un periodo y una dirección.

La altura de ola visual queda de esta forma como:

$$H_v = \sqrt{H_{SEA}^2 + H_{SWELL}^2} \quad (I.1)$$

Los valores para el período T_v , y la dirección compuesta θ_v , se obtienen directamente del periodo y dirección correspondientes a la altura de ola mayor entre el oleaje de viento y el oleaje de fondo.

$$\begin{aligned} T_v = T_{SEA}; \theta_v = \theta_{SEA} \\ T_v = T_{SWELL}; \theta_v = \theta_{SWELL} \end{aligned} \quad \text{si} \quad \begin{aligned} H_{SEA} \geq H_{SWELL} \\ H_{SWELL} > H_{SEA} \end{aligned} \quad (I.2)$$

Los datos de las observaciones históricas, presentan ciertas desventajas en cuanto a la corta duración de las series temporales, heterogeneidad espacial y en general, se trata de datos que no han sido sometidos a un control de calidad que garantice su fiabilidad.

Sin embargo, el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, GIOC, dentro del marco del Sistema de Modelado Costero SMC, ha diseñado un módulo de ayuda a la caracterización del oleaje a partir de la base de datos de oleaje visual de barcos en ruta, denominado ODIN, que permite obtener los regímenes medios de oleaje en cualquier punto de la costa Española.

El programa ODIN permite obtener, para cualquier área de la costa española, la siguiente información :

- Los regímenes medios direccionales del oleaje visual (alturas de ola y periodos) en profundidades indefinidas y una profundidad objetivo.
- Las características del oleaje asociadas al flujo medio de energía.
- Los oleajes que caracterizan las condiciones medias anuales.

b) Datos medidos en boyas

Puertos del Estado dispone de una red de información instrumental que incluye: la red de boyas situadas en aguas profundas y la red costera. Estas bases de datos instrumentales, permiten acceder a series de oleaje de hasta 20 años de antigüedad, y proporciona datos de oleaje en tiempo real en puntos de aguas profundas y poco profundas. Ambas redes cubren la totalidad de la península y parte de los archipiélagos.

La red de aguas profundas está formada por 9 boyas *Seawatch* y 3 *Wavescan*, y la ubicación de los instrumentos oscila en profundidades entre 200 y 800 metros, tomando datos relativos a parámetros oceanográficos y meteorológicos.

La red costera de Puertos del Estado proporciona datos de oleaje en puntos de aguas poco profundas. Su objetivo es complementar las medidas de la red exterior en lugares de especial interés para las actividades portuarias o la validación de modelos de oleaje. Consta de 18 boyas escalares *Waverider* (red REMRO), y de 5 boyas direccionales.

De forma adicional, la red de boyas de la Generalitat de Catalunya dispone de 5 boyas *Waverider*, 3 escalares (Rosas, Tordera y Llobregat) y 2 direccionales (Tortosa y Trabucador).

Esta información se puede obtener en las siguientes referencias electrónicas:

<http://www.puertos.es>

<http://moises.puertos.es/Redes/>

<http://lim050.upc.es/projects/xiom/>

Adicionalmente, se puede encontrar información en el documento de Recomendaciones de Obras Marítimas ROM 0.3-91-Oleaje, Atlas de Clima del Litoral Español, que ofrece información de los regímenes medios y extremos provenientes de registros instrumentales para boyas, así como de la estructura espectral escalar básica de temporales.

c) Datos obtenidos con técnicas de reanálisis

Una de las fuentes de datos más importantes en la actualidad, con aplicación directa a estudios de agitación y resonancia portuaria, son las bases de datos obtenidas con técnicas de reanálisis, tales como las bases de datos de los proyectos WASA, ERA-40, WANA y principalmente HIPOCAS.

El conjunto de datos WASA (1998) procede del proyecto financiado por la UE que lleva el mismo nombre. La base de datos que este proyecto ofrece está formada por el reanálisis de oleaje de 40 años (1955-1994). Los datos se obtuvieron aplicando el modelo de generación de oleaje WAM en el Atlántico Norte, que ha sido alimentado con series históricas de 40 años de vientos.

El resultado de la aplicación del modelo WAM, es una base de datos con parámetros de viento, oleaje y espectro direccional en cada uno de los puntos de la malla utilizados

Adicionalmente, se cuenta con la base de datos del reanálisis de oleaje ERA-40 del centro europeo (<http://www.ecmwf.int/research/era/>), con una resolución de malla de 1.5° en la zona del atlántico.

Por otro lado, el proyecto WANA, llevado a cabo por Puertos del Estado, utiliza el modelo WAM de generación del oleaje en una red próxima a las costas españolas con datos desde el año 1995, cada 3-5 horas y con una resolución espacial de 0.125°-0.25°.

Finalmente, el proyecto HIPOCAS Soares *et al.* (2002), se ha designado a la generación de una base de datos homogénea de 44 años (1958-2001), con una resolución horizontal que oscila entre 0.25° y 0.125° y resoluciones temporales que varían entre 1 y 3 horas.

La base de datos del proyecto HIPOCAS, se obtiene a partir de el reanálisis de 44 años de datos atmosféricos realizado por el *National Centre for Environmental Prediction*, Washington, USA (NCEP) y el *National Centre for Atmospheric Research*, Boulder, Colorado, USA (NCAR) haciendo uso de los modelos numéricos WAM para oleaje y HAMSOM para nivel del mar.

Actualmente, la base de datos del proyecto HIPOCAS se ha extendido a la zona Mediterránea, incluyendo variables atmosféricas tales como el viento a 10 metros, presión superficial y temperatura del aire a 2 metros de altura, junto con parámetros oceanográficos tales como altura significativa y periodo de pico de ola y residuo del nivel de mar entre otros.

Las distintas bases de datos muestran diferentes características en cuanto a la calidad, duración y continuidad de los datos, siendo la base de datos del proyecto HIPOCAS la más adecuada, ya que incluye series temporales de 44 años con una resolución temporal de 1 hora y espacial de 0.125°, ideal para alimentar los estudios de agitación y resonancia portuaria.

Debido a que la base de datos HIPOCAS original muestra errores cuantitativos con respecto a las redes de medidas para las alturas de ola, las series de oleaje del proyecto HIPOCAS, han sido sometidas a un proceso de corrección para mejorar la calidad de las magnitudes de altura de ola, Tomás A. (2004).

La información referente al proyecto HIPOCAS se puede obtener en las siguientes referencias electrónicas:

<http://www.puertos.es>

<http://coast.gkss.de/lotse/out/one/meta/HIPOCAS.html>

d) Bases de datos alternativas, teledetección

El proyecto ENVIWAVE, financiado por la Unión Europea, determina parámetros de oleaje a partir de datos suministrados por el satélite ENVISAT (Agencia Espacial Europea). Este estudio de datos de oleaje provenientes de técnicas de teledetección comenzó en el 2002.

El objetivo principal del proyecto ENVIWAVE, es la utilización de las medidas proporcionadas por el satélite ENVISAT, con dos instrumentos distintos: el Radar de Apertura Sintética (ASAR) y el Altimetro (RA-2). Ambos sensores proporcionan medidas de variables meteorológicas y oceanográficas con una gran calidad.

Los objetivos generales del proyecto son múltiples, distinguiendo entre los de aplicación directa de las medidas realizadas por el instrumental y los de desarrollo de subproductos a partir de la utilización de dichas medidas de manera indirecta.

Los objetivos perseguidos se pueden resumir son los siguientes:

- Calibración y validación de las medidas tomadas por el ASAR y RA-2 abordo del ENVISAT.
- Generar productos de viento y oleaje a partir de las medidas realizadas por el ASAR y el RA-2, calibrados en tiempo real.
- Creación de una base de datos que integre medidas realizadas por satélite, junto con las salidas de los modelos numéricos y la información proporcionada por las boyas disponibles.
- Desarrollo de nuevos algoritmos de asimilación de datos en los modelos numéricos, especialmente, el espectro completo de oleaje.
- Análisis de los efectos de la asimilación en distintos escenarios climáticos.
- Evaluación de los beneficios de la asimilación en la predicción a corto plazo.
- Mejorar el conocimiento del oleaje costero.
- Disseminación de los resultados obtenidos.

Siguiendo la línea de los objetivos generales del ENVIWAVE, Puertos del Estado, único participante español en dicho proyecto, pretende cumplir con los siguientes objetivos particulares.

- Dotar de un esquema de asimilación de datos de satélite al sistema de predicción de oleaje desarrollado en Puertos del Estado.
- Dotar al sistema de predicción de un esquema de asimilación de datos de boya. Con ello se pretende mejorar las condiciones de contorno suministradas a los sistemas de predicción local instalados en las autoridades portuarias.
- Completar el atlas de oleaje existente en Puertos del Estado, integrando la nueva información suministrada por el satélite en esta base de datos.

Con la información de los parámetros del oleaje que obtenga Puertos del Estado con el proyecto ENVIWAVE, se podrán alimentar los estudios de agitación y resonancia portuaria en un futuro cercano, para amplias zonas del litoral español con resoluciones espaciales y temporales de gran calidad.

Para mayor información de estas bases de datos alternativas de oleaje, se pueden revisar las siguientes referencias electrónicas:

<http://www.oceanor.no/projects/enviwave/>

<http://forecast.uoa.gr/enviwave/>

De forma adicional, en Alves & Young (2003), se puede verificar otro estudio sobre estimación de altura de ola significativa a partir de datos de satélites, contando con una serie de 10 años de duración (1986-1995) y con una resolución espacial de 2°.

I.2.3 Nivel del mar

La información necesaria para la obtención del régimen del nivel de marea se puede obtener de la red de mareógrafos REDMAR, que el EPPE ofrece en diferentes puntos a lo largo del litoral Español.

La Red de Mareógrafos REDMAR está en funcionamiento desde 1992, con el objetivo de monitorizar el nivel del mar en tiempo real, y generar series históricas para su posterior explotación.

En la actualidad la red está constituida por 15 mareógrafos acústicos SONAR y 7 mareógrafos de presión AANDERAA.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta la acción conjunta de la marea astronómica, de la marea meteorológica, y el nivel de ascenso por acción del oleaje, que en conjunto se definen como el régimen de nivel de mar, o el régimen de cota de inundación, el cual se puede consultar en el Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español.

La herramienta informática denominada Atlas, dentro del Sistema de Modelado Costero SMC, desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas,

permite obtener los regímenes medios y extremales de nivel de marea y de cota de inundación de playas abiertas del litoral peninsular español.

Los usos del programa Atlas son la determinación de:

- La cota de berma asociada a los perfiles de playa.
- La cota asociada al nivel de marea.
- Definir cotas de francobordo para el diseño de obras costeras (diques, paseos marítimos, muros, etc.).

El Sistema de Modelado Costero, desarrollado por el GIOC y la Universidad de Cantabria, se presenta con detalle en la siguiente referencia electrónica.

<http://www.smc.unican.es/>

I.2.4 Evaluación de las bases de datos

Tras describir las diferentes fuentes de información existentes, el proceso de evaluación y selección de las diferentes bases de datos debe obedecer a ciertas consideraciones, y recomendaciones con base en las limitaciones propias que cada base de datos presenta.

Este apartado se encarga de resumir las consideraciones a tener en cuenta por el ingeniero o técnico que pretenda emplear las fuentes de datos antes mencionadas, para su posterior aplicación a proyectos de agitación y resonancia portuaria.

En cuanto a los datos visuales, a pesar de su larga duración, presentan importantes carencias en cuanto a zonas limitadas de tránsito de barcos (rutas predeterminadas), presentan discontinuidades temporales importantes y no cuentan con datos extremales.

Los datos visuales tienden a presentar una gran subjetividad, pues en su apreciación influye mucho la experiencia del observador.

En cuanto a las series instrumentales, especialmente las correspondientes al sistema de boyas de EPPE, se debe de subrayar su limitada distribución espacial, además de una

importante limitación temporal de sus registros. Los datos instrumentales no pueden ser utilizados de forma directa para realizar una buena base de datos. No obstante, su calidad y fiabilidad es muy alta y constituye la mejor red de observación existente en España.

Los datos disponibles del proyecto WANA se limitan a la costa española y las series de datos no tienen una longitud suficiente.

Inicialmente, la base de datos WASA se presentó como una base de datos de oleaje completa, obtenida a partir de un retro-análisis sobre una malla relativamente densa. Sin embargo, ésta ha sido superada ampliamente por las bases de datos desarrolladas posteriormente, como la base de datos obtenida con el proyecto HIPOCAS, que incluye un retro-análisis de 44 años y una mayor resolución temporal y espacial.

Se puede mencionar que la base de datos ERA-40 presenta el retro-análisis más largo, con 46 años de duración, pero presenta una resolución espacial y temporal inferior a la base de datos de HIPOCAS.

Finalmente, es necesario resaltar que los proyectos basados en datos provenientes de trabajos de teledetección no tienen series de datos suficientemente largas, y no siempre cuentan con suficiente resolución espacial. Sin embargo, en el futuro se prevé que esta vía de información alternativa, sea la proveedora de bases de datos completas y fiables.

En esta metodología se recomienda utilizar los datos HIPOCAS calibrados y validados con los datos instrumentales de las boyas, siempre que EPPE los pueda poner a disposición del usuario.

Los datos HIPOCAS almacenados hasta el momento incluyen Oleaje, Viento a 10 metros, y residuos de Nivel del Mar. En el caso del oleaje se ha almacenado la descomposición de Mar de Viento y Mar de Fondo. En estos momentos los datos se distribuyen en estado original o bien calibrados, la figura I.1 muestra la posición de los nodos HIPOCAS disponibles.

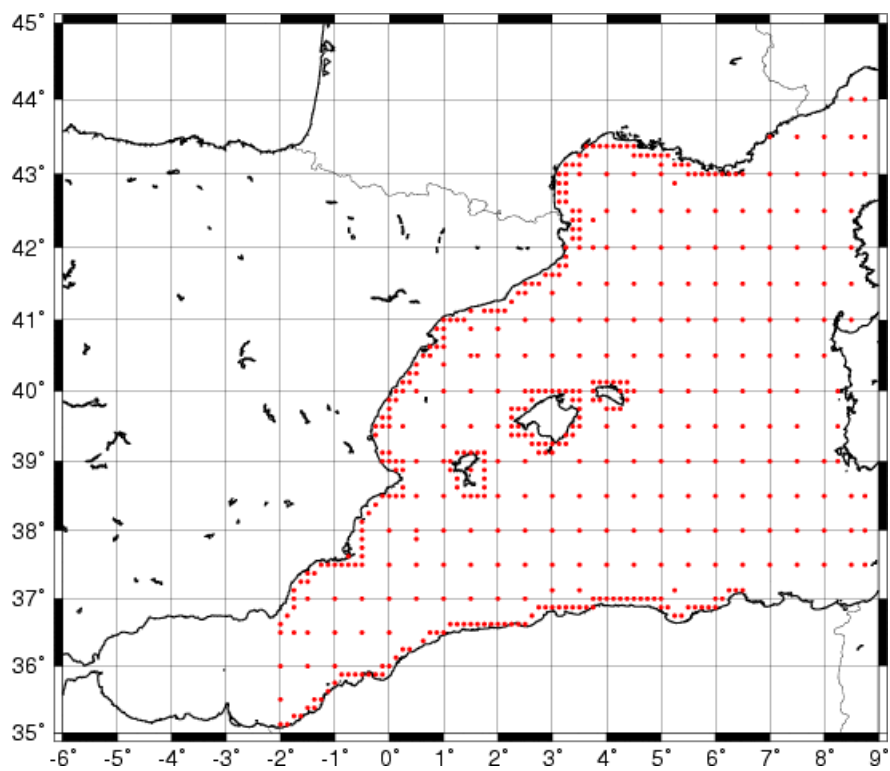


Figura I.1 Posición de los nodos HIPOCAS disponibles

I.3 DETERMINACIÓN DE LOS ELEMENTOS FORZADORES

La segunda tarea dentro de la metodología integral para la realización de estudios de agitación y resonancia portuaria, consiste en determinar los elementos forzadores que serán utilizados en cada caso de estudio particular, dependiendo de los objetivos particulares de cada proyecto (resonancia, agitación portuaria, diseño de estructuras, dragados, ampliaciones, etc.).

Este apartado se encarga de presentar una metodología que ofrece al técnico la capacidad de analizar las series temporales mencionadas en el apartado anterior, y trasladar las bases de datos, desde aguas profundas a los puntos de interés que delimitan los dominios de estudio.

Además de las bases de datos mencionadas, se propone la utilización de series de datos inéditas, obtenidas directamente de campañas de campo, que ayuden a determinar la duración y características generales de los elementos forzadores que se deben seleccionar en cada estudio de agitación y resonancia portuaria.

El objetivo de esta sección es caracterizar e identificar los elementos forzadores que se utilizan como condiciones iniciales para los estudios de agitación y resonancia portuaria, y que a su vez alimentan a los modelos numéricos que ésta metodología propone.

Se presenta, en primer lugar, la caracterización de los elementos forzadores a utilizar, a través de la aplicación de la metodología de análisis de series temporales de superficie libre, propuesta por Lara *et al.* (2002).

En segundo lugar, se presentan los criterios para definir las condiciones de contorno a ser utilizadas en las simulaciones numéricas, además de las recomendaciones que se deben de seguir para su correcta adaptación.

I.3.1 Caracterización de los elementos forzadores

Los elementos forzadores que actúan sobre los puertos están relacionados con diversos tipos de procesos de generación y transferencia de energía que ocurren en zonas alejadas de las costas, generalmente en profundidades indefinidas.

Tal como se dijo anteriormente, se recomienda realizar campañas de campo que permitan caracterizar localmente la onda larga y corta.

Los datos que se obtienen de las campañas de campo, deben ser caracterizados a través de técnicas matemáticas avanzadas, con el objetivo de poder identificar aquellas frecuencias y energías asociadas a las oscilaciones de la superficie libre que pueden llegar a interactuar de forma negativa con las instalaciones portuarias.

Este apartado presenta un resumen de las técnicas y aplicaciones, para el análisis de series temporales de superficie libre y presión medidos en campo, para identificar los posibles elementos forzadores de agitación y resonancia portuaria.

En primer lugar, se presenta un resumen de recomendaciones que se deben de seguir a la hora de diseñar una campaña de campo: el tipo de equipo y sensores a utilizar; la localización de éstos en el dominio de estudio, y el tipo de resultados que se deben obtener para que se pueda aplicar la metodología de análisis de series temporales.

En segundo lugar, se hace un resumen de las técnicas existentes en la literatura para el análisis de series de oleaje irregular, identificación de grupos de ondas, y estudio de las ondas largas vinculadas a los grupos.

En tercer lugar, se describe resumidamente la metodología para la caracterización de la onda larga a partir de mediciones de series temporales de onda corta.

a) Campañas de campo

A continuación, se expone información de apoyo sobre el equipo, localización, y duración recomendada, para aquellas campañas de campo que se diseñen para los estudios de agitación y resonancia portuaria.

La tarea consiste en llevar a cabo mediciones de las oscilaciones dentro y fuera de los puertos, así como de los posibles elementos forzadores que pueden llegar a actuar como desencadenante de los episodios de resonancia.

Se recomienda identificar aquellas zonas de especial interés, tanto dentro como fuera de las instalaciones portuarias, que pueden arrojar información relevante sobre los procesos de transformación de las ondas, y los valores de sobre-amplificación por efectos resonantes.

Esta labor se puede llevar a cabo simplemente con una inspección visual de la batimetría. Sin embargo, se recomienda la consideración previa del oleaje en la zona de estudio, con base en los regímenes medios y extremales, y propagaciones con modelos tipo parabólicos y elípticos. Con ello se pueden identificar puntos singulares exteriores y la localización de nodos y antinodos dentro de las dársenas.

En general, las áreas presentan características a las que hay que prestar una especial atención:

- Zona exterior, lo suficientemente alejada para evitar la influencia de cualquier posible energía reflejada de los contornos costeros y portuarios, y preferiblemente localizada sobre un fondo batimétrico con pendiente suave.
- Bajos o islas, que puedan cambiar bruscamente los parámetros del oleaje y facilitar la posible generación de efectos no lineales.

- Las zonas que presentan importantes efectos de reflexión / disipación de energía, frente a las playas cercanas o interiores a las dársenas; frente a los diques de escollera, y en las bocanas de los puertos. Todas estas zonas son también importantes por su potencialidad de generar ondas largas libres.
- Zonas de especial sobre-amplificación resonante (antinodos), situadas en las esquinas de las dársenas, al fondo de los canales portuarios, y adyacentes a las paredes verticales de las dársenas.

La disposición de los equipos de medición debe, al menos, contar con un sensor que registre el movimiento de la superficie libre o de presión en el fondo en aquellos puntos de especial interés y, a ser posible, con la utilización de sensores complementarios que registren los valores de velocidades horizontales en dichos puntos, fundamentalmente en zonas interiores donde se formen nodos. Esto permitirá complementar el análisis numérico y calibración posterior.

Se recomienda la utilización de sensores de presión para poder medir adecuadamente aquellas variaciones de nivel de largo periodo. De forma adicional, y debido a que los sensores de presión no son capaces de registrar aquellas oscilaciones de superficie libre que ya sea por su amplitud o por su periodo, no se vean afectados por la profundidad, se deben de complementar las mediciones con la utilización de boyas direccionales de superficie libre, particularmente en las zonas más alejadas al puerto donde se encuentran las mayores profundidades.

Debido a que el número de sensores a utilizar en cada campaña es función del equipo propio de cada empresa o institución, y que generalmente la disponibilidad de los sensores se ve limitada por los altos costes que se derivan de cada campaña de campo, este apartado recomienda un mínimo de sensores para poder aplicar la metodología de análisis de los elementos forzadores:

- Un sensor de presión en la zona exterior suficientemente alejado de las instalaciones portuarias, que servirá para determinar el forzamiento exterior sin influencia de energía reflejada desde los contornos.

- Una boya direccional P-UV localizada en el mismo punto que el sensor de presión mencionado anteriormente.
- En el caso de no disponer de una boya direccional, la direccionalidad se puede obtener mediante la utilización de un conjunto de 3 a 4 sensores escalares de presión y/o superficie libre localizados con una disposición lineal que sea perpendicular a la dirección predominante del oleaje, o bien si el oleaje abarca un amplio abanico de direcciones, se debe de utilizar disposiciones triangulares tipo delta o en estrella, propuestos en Horikawa (1988).
- Se recomienda contar con un sensor de presión y velocidad horizontal P-UV en cada bocana del puerto para medir las velocidades de carga y descarga del flujo bajo oscilaciones resonantes.
- Un sensor de presión al menos en la dársena principal, si fuera posible, en algunas dársenas internas, de preferencia en puntos adyacentes a muelles verticales e impermeables.

No se puede establecer en forma determinista la duración de la campaña de campo para realizar mediciones continuas de superficie libre o presión, y aunque los posibles elementos forzadores de un episodio resonante suelen tener una duración del orden de minutos, su ocurrencia es generalmente súbita e indeterminada. Por lo tanto, la medición de oscilaciones de onda larga requiere largos periodos de registro.

Por ello, se recomienda que la duración de cada serie medida, sea representativa al menos de un número importante de periodos de la onda larga a estudiar, considerando adicionalmente que la campaña debe de ser lo suficientemente larga para aumentar la probabilidad de obtener registros de resonancia en calas y puertos y diferentes condiciones energéticas de agrupamiento de ondas cortas (oleajes medios y temporales).

Tras una revisión del estado del arte sobre algunas campañas de campo que se han orientado a estudiar oscilaciones de largo periodo, se ha observado que dichas campañas se plantean con duraciones entre 2 y 4 meses, para intentar abarcar ciclos

estacionales (invierno – verano) que conserven cierta homogeneidad en las características del estado de mar.

Con el fin de determinar la época o épocas en que se deben realizar las campañas de campo, se recomienda realizar un trabajo previo a partir de un estudio numérico con el fin de identificar aquellas frecuencias que presentan eventos de agitación y resonancia en el puerto. Se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

1. Llevar a cabo un estudio numérico que permita identificar las frecuencias resonantes del puerto de estudio. Para esto se debe llevar a cabo simulaciones numéricas con modelos lineales tipo MSP, que permitan realizar un barrido de frecuencias de onda larga, F_{Li} . Los detalles acerca de qué modelos utilizar y cómo, se describen más adelante.

2. Una vez definidas las frecuencias resonantes de interés F_{Li} , es necesario determinar los estados de mar susceptibles de generar dichas frecuencias de onda larga. Por ello son necesarias las formulaciones empíricas que relacionen las alturas y periodos de la onda larga, con los valores espectrales de altura de ola significativa y periodo de pico del estado de mar asociado.

Estas relaciones lineales empíricas que ligán parámetros de las ondas largas y cortas se pueden utilizar directamente con los parámetros propuestos en la literatura o, bien se pueden proponer nuevas relaciones con series de datos de superficie libre y/o presión de la zona de estudio adquiridos en campañas anteriores o en zonas cercanas, tal que:

$$\begin{aligned} H_s^* &= K_1 T_p^{\alpha_1} H_s^\beta \\ T_p^* &= K_2 T_p^\delta H_s^\varepsilon \end{aligned} \tag{I.3}$$

donde

K_n - parámetro de ajuste

H_s^* - altura de ola significativa para onda larga

T_p^* - periodo de pico para onda larga

H_s - altura de ola significativa para onda corta

T_p - periodo de pico para onda corta

$\alpha, \beta, \delta, \varepsilon$ - parámetros empíricos de ajuste

3. Por otro lado, a partir de la base de datos de oleaje HIPOCAS, se puede encontrar una relación entre la altura de ola significativa y periodo de pico de los estados de mar, de la zona de estudio en profundidades indefinidas, donde:

$$H_s = \alpha T_p^\beta \quad (I.4)$$

Relaciones de este tipo se proponen directamente en el documento de Recomendaciones de Obras Marítimas ROM 0.3-91, a partir de datos instrumentales de boyas en condiciones de temporal.

4. Una vez definidas las frecuencias de onda larga resonantes F_{Li} , y combinando las ecuaciones I.3 y I.4, se puede definir para cada frecuencia de interés los valores de H_s, T_p, H_s^* y T_p^* .
5. Una vez definidos los estados de mar H_s y T_p relacionados con frecuencias resonantes de interés F_{Li} , se identifican las épocas mas probables en que ocurren dichos estados de mar, con base en la base de datos de oleaje HIPOCAS o equivalente y sus correspondientes regímenes de oleaje. Con esta información, se puede definir las fechas más adecuadas para llevar a cabo la campaña o campañas de campo.

Este procedimiento no garantiza que durante la campaña de campo diseñada se presente la onda larga resonante de interés, no obstante, orienta al ingeniero o técnico a la hora de elegir la época de año más probable de ocurrencia de las frecuencias de oscilación resonantes que se pretende evaluar.

Por otro lado, este pre-análisis permite identificar *a priori*, casos de estados de mar que pueden generar las ondas largas resonantes en nuestro puerto de

estudio. Información que se utilizará más adelante a la hora de generar los casos a ser modelados numéricamente.

b) Caracterización de los grupos de olas a partir de registros de campo

Las oscilaciones irregulares que se miden en el campo, generalmente presentan paquetes energéticos bien definidos en forma de grupos de ondas cortas, que a su vez pueden llegar a vincular oscilaciones de largo periodo, actuando en ocasiones como elementos forzadores de los episodios de resonancia en puertos.

A continuación, se presenta de manera resumida las técnicas de análisis de series temporales de superficie libre que ayudan al ingeniero de costas, a caracterizar los grupos de ondas.

En el dominio temporal se puede evaluar:

- Las envolventes de altura de ola de los registros, Goda (1970); Rye (1982)
- Las longitudes de racha y de grupo, Goda (1983); Kimura (1980)
- Las series temporales de energía (técnica SIWEH), Funke & Mansard (1979)

En el dominio frecuencial se puede evaluar:

- Mediante el análisis espectral de los grupos de ondas, Bowers (1988); Battjes *et al.* (1984)
- Los parámetros de apuntamiento, Battjes *et al.* (1984); Goda (1983)
- La determinación de la onda de *set-down*, Ottesen-Hansen *et al.* (1980); Bowers (1992); Nelson (1988); Medina (1990); Sand (1982).
- *Surf-beat*, ondas de borde (*edge waves*), ondas largas vinculadas a grupos (*bound long waves*), Baldock *et al.* (1997); Barthel *et al.* (1984); Bowers (1977); Dingenmans *et al.* (1992).

Dado que estas técnicas son suficientemente conocidas, no serán más desarrolladas.

c) Caracterización de onda larga a partir de registros medidos en campo

Las oscilaciones de largo periodo también conocidas como ondas infragravitatorias son una de las componentes fundamentales de la resonancia portuaria. Actualmente no existen estudios definitivos capaces de determinar una función de ocurrencia de las características de las ondas largas así como un espectro de energía que las represente, como sucede para las ondas cortas.

La metodología integral de análisis de oscilaciones y resonancia portuaria planteada en esta Tesis, ofrece un análisis de las características de las oscilaciones de largo periodo y de su relación con las ondas de corto periodo a partir de datos procedentes de dos campañas de campo en el Puerto de Lastres y en el Puerto de Gijón.

Los pasos que se deben seguir para llevar a cabo la identificación de las características de las ondas infragravitatorias vinculadas a los registros de onda corta se resumen a continuación:

- a) Se debe sustraer la componente de la marea y del nivel medio de los datos de presión obtenidos.
- b) Se realiza una transformación de los datos de presión obtenidos a superficie libre.
- c) Se identifican los estados de mar de interés, y se obtienen para cada uno de los estados de mar seleccionados los parámetros espectrales: periodo de pico (T_p), momento de orden-n (m_n), altura de ola significativa (H_s), anchura espectral de Longuet-Higgins (ν^2).
- d) Se realiza un ajuste de un espectro tipo JONSWAP definido a partir de la altura de ola significativa (H_s) y el periodo de pico (T_p), de los datos anteriores.
- e) Se eligen todos aquellos estados de mar cuyo coeficiente de correlación lineal para el ajuste anterior sea mayor que 0.97.

- f) Se ajustan los datos elegidos en el punto anterior, y se obtienen las relaciones lineales que definen los parámetros de onda larga a partir de los parámetros espectrales de onda corta a través de un ajuste lineal del tipo:

$$H_L^* = K \cdot H_s^\alpha \cdot T_p^\beta \cdot \gamma^\delta \cdot \nu^\varepsilon \quad (I.5)$$

$$T_L^* = K \cdot H_s^\alpha \cdot T_p^\beta \cdot \gamma^\delta \cdot \nu^\varepsilon \quad (I.6)$$

donde

K - parámetro de ajuste

H_L^* - altura de ola para onda larga

H_s - altura de ola significativa del estado de mar

T_p - periodo de pico asociado a un estado de mar

T_L^* - periodo de onda larga

γ - parámetro de apuntamiento

ν - Anchura espectral de Longet - Higgins (1957)

$\alpha, \beta, \delta, \varepsilon$ - parámetros empíricos

- g) Adicionalmente se realiza un análisis de correlación onda corta – onda larga a través de la transformada *wavelet*, y se obtienen los valores frecuenciales, energía y duración de los paquetes de energía de onda larga.

En la tabla I.2, se muestra un resumen de los parámetros de ajuste que ofrece la literatura para diversas localizaciones, así como los parámetros obtenidos para los puertos de Lastres y Gijón.

Tal y como se dijo anteriormente, estas formulaciones pueden ser utilizadas de forma inversa, definiendo *a priori* periodos de resonancia con un modelo numérico lineal elíptico, para a continuación relacionar dichos periodos con valores altura de ola significativa de onda larga con las relaciones empíricas obtenidas, y finalmente determinar los estados de mar de onda corta (H_s y T_p) que puedan generar dichas ondas infragravitatorias.

Autor	α	β	δ	T_L^*
Vis (1985)	2	1.2	0	-
Nelson (1988)	1.77	1.77	0	-
Medina (1990)	2	0.5	0	-
Bowers (1992)				-
<i>Port Talbot</i>	1.32	1.17	0.34	-
<i>Sherham Harbour</i>	0.93	0.99	0.06	-
<i>Barrow-in-Furness</i>	1.08	1.59	0.36	-
<i>Bowers (valor final)</i>	1.11	1.25	0.25	-
Gijón	1.402	0.66	0	7 a 11 Tp
Lastres	1.36	0.81	0	8.03 Tp

Tabla I.2 Coeficientes en los ajustes propuestos en la literatura

Esta es una información valiosa para determinar la época en que se deben de llevar a cabo las campañas de campo.

I.3.2 Caracterización de los estudios a realizar y datos de entrada en el análisis hidrodinámico de puertos

Una vez establecido el procedimiento para analizar las series temporales históricas de oleaje, y las series de superficie libre obtenidas a partir de campañas de campo, se procede al trabajo de preparación de dicha información para establecer los forzamientos (onda larga y onda corta), que permitirán estudiar la agitación y resonancia portuaria mediante la aplicación de modelos numéricos.

Los elementos forzadores que se utilizan en los estudios de agitación portuaria en general, se pueden obtener a partir de series históricas y medidas de campo, descritas en la sección anterior, las cuales se resumen como:

1. Serie de estados de mar (HIPOCAS), con una resolución temporal de un estado de mar ($H_s(t), T_p(t), \theta_m(t)$).
2. Series de boyas escalares de los últimos 20 años, y direccionales en los últimos 8 años a lo largo del litoral español.

3. Componentes resonantes asociadas a estados de mar, obtenidas a partir de series medidas y las series de estados de mar en los últimos 18 años $(H_S(t), T_P(t), H_L^*(t), T_L^*(t))$.
4. Series de oleaje y velocidades medidas en campañas de campo.

Para poder plantear los diferentes casos dentro de los estudios de agitación y resonancia portuaria, además de considerar el objetivo final de cada estudio, como pueden ser estudios de agitación, resonancia, dinámica sedimentaria, diseño de estructuras, etc., se debe de conocer las herramientas numéricas disponibles, sus distintas hipótesis y rangos de aplicación espacial y temporal.

En este apartado se proponen tres modelos de propagación, cuyo fin es transferir el oleaje desde profundidades indefinidas hasta la zona del puerto. Estos modelos son:

1. El modelo OLUCA que se basa en una aproximación parabólica de las ecuaciones de la pendiente suave (*parabolic mild slope equations*).
2. El modelo MSP que se basa en la aproximación elíptica de las ecuaciones de la pendiente suave (*elliptic mild slope equations*).
3. El modelo MANOLO que se basa en las ecuaciones modificadas de Boussinesq (*modified Boussinesq equations*).

Estos modelos se describen en la siguiente sección.

Estos modelos necesitan ser alimentados con diferentes tipos de forzamientos, que van desde ondas monocromáticas, y espectros teóricos para los modelos OLUCA y MSP, hasta series temporales monocromáticas de onda corta, series temporales monocromáticas de onda larga, series temporales de superficie libre (oleaje irregular), que incluyen las oscilaciones irregulares de onda corta y onda larga vinculada, y las

series temporales de superficie libre de onda larga que en ocasiones se miden en el campo para el modelo MANOLO.

En la tabla I.3 se resumen los diferentes tipos de estudios en puertos, donde se especifica el objetivo del estudio, tipo de análisis que se debe llevar a cabo, los datos de entrada requeridos, las fuentes de datos necesarias, y las herramientas numéricas de propagación.

Tipo de estudio portuario	Objetivo	Tipo de análisis	Datos de entrada requeridos	Fuente	Modelo	
Estudio de agitación para puertos comerciales, pesqueros y deportivos. $4s < T_p < 30s$	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la operatividad del puerto, % de tiempo anual en que el puerto cumple con sus funciones de diseño (navegabilidad, pernocta, tránsito de mercancías, etc.). • Estudios de seguridad, servicios y explotación en puertos, (modos de fallo y modos de parada, ROM 0.0). 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtener para diferentes puntos dentro y en las cercanías del puerto: • Regímenes medios direccionales del oleaje. • Regímenes extremales direccionales del oleaje. 	Pre-diseño	Discretización de los regímenes medios y extremales en componentes de oleaje, manteniendo las frecuencias de ocurrencia (H_s, T_p, θ , Probabilidad, niveles de marea)	<ul style="list-style-type: none"> • Series de datos HIPOCAS • Boyas direccionales • Atlas de inundación y mareas (Puertos de Estado) 	OLUCA MSP
			Diseño	Diseño Generar un hipercubo en 4D con una serie de casos de interpolación de (H, T, θ , marea)	<ul style="list-style-type: none"> • Series de datos HIPOCAS (delimitado para la zona de estudio) • Boyas direccionales • Atlas de inundación y mareas (Puertos de estado) 	
Estudios de resonancia en puertos $30s < T_p$	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar frecuencias naturales de resonancia en puertos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtener relaciones de amplitud vs. frecuencia en puntos dentro del puerto. 	Ruido blanco (barrido de frecuencias), en el rango de periodos $30 < T < T_{max}$	<ul style="list-style-type: none"> • Definir cantidad de energía de baja frecuencia asociada a altas frecuencias. Martín (2003) 	OLUCA MSP	
	<ul style="list-style-type: none"> • Estudiar eventos simultáneos de estados de mar con onda larga vinculada. • Análisis de sensibilidad del efecto de los parámetros hidrodinámicos y geométricos. • Entender el comportamiento de eventos independientes mediante un análisis transitorio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar las frecuencias resonantes, los efectos no lineales, efectos transitorios, y la interacción de la onda larga y corta en las dársenas. 	Espectro JONSWAP que incluya la onda corta y larga, a partir de casos (H_s, T_p, H_L^*, T_L^*).	<ul style="list-style-type: none"> • Datos HIPOCAS • Datos de campo 	OLUCA MANOLO	
Estudios de dinámica sedimentaria para sistemas playa – puerto	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar tasas de transporte en el puerto y zonas aledañas. • Dragados en zonas internas y externas del puerto, y evaluación en el tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtener regímenes medios y extremales de transporta litoral en la zona de estudio (escala medio – largo plazo) 	A la serie histórica de oleaje en el exterior, se le debe aplicar una función de transferencia a través de la aplicación del hipercubo en 4D de interpolación con el fin de propagar los oleajes a puntos de interés en la zona litoral del puerto.	<ul style="list-style-type: none"> • Serie HIPOCAS • Atlas de inundación • Niveles del mar (puertos del Estado) 	OLUCA MSP	
		<ul style="list-style-type: none"> • Calcular el transporte de sedimentos para estados de mar a lo largo del tiempo (escala de corto plazo). 	Espectros de energía JONSWAP, o series medidas de superficie libre. Niveles del mar.	<ul style="list-style-type: none"> • Boyas. • Datos de campo. • Datos HIPOCAS. • ROM 0.3-91 (boyas). 	OLUCA MANOLO	
Estudio de diseño de estructuras en puertos	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar los elementos dinámicos que permiten diseñar las obras desde un enfoque funcional y estructural. 	Diseño estructural	Regímenes medios y extremales direccionales en el exterior. Serie histórica de oleaje exterior	<ul style="list-style-type: none"> • Datos HIPOCAS. • ROM 0.3-91 (boyas). 	OLUCA MSP	
		Diseño funcional	Estados de mar onda larga + corta (corto plazo).	<ul style="list-style-type: none"> • Boyas. • Datos de campo. • Datos HIPOCAS. 	MANOLO	

Tabla I.3 Resumen de los estudios en puertos, objetivos, análisis, datos de entrada, fuentes de datos, y modelo numérico a utilizar

En la tabla I.3 se resumen algunos estudios en dársenas de puertos, donde se especifica el objetivo del estudio, el tipo de análisis que se debe llevar a cabo, los datos de entrada requeridos, las fuentes que tienen y las herramientas numéricas de propagación que se proponen en la metodología.

En esta tabla se habla de la necesidad de generar un poliedro de 4 dimensiones con datos en (H_s , T_p , θ , y nivel de marea), con el fin de propagar estos casos de oleaje hasta el puerto, y poder así transferir la serie exterior (44 años cada hora), en distintos puntos de interés seleccionados. El procedimiento que se debe seguir es el siguiente:

1. Definir una malla de estudio en donde se va a aplicar el modelo OLUCA, dicha malla se diseña sobre la batimetría de la zona de estudio o área en la que se desea analizar la propagación desde aguas profundas.

Por requerimiento del modelo utilizado, una de las alineaciones de la malla ha de coincidir con la dirección de propagación del oleaje, o estar comprendida en un ángulo no superior a $\pm 60^\circ$ respecto a dicha dirección. Por este motivo, y dado que las configuraciones del área de estudio varían de manera importante de un estudio a otro, se recomienda seleccionar una malla general de propagación (discretizadas espacialmente de 100 m a 200 m), y mallas de detalle anidadas la malla general (discretizadas espacialmente de 10 m a 20 m), para las distintas zonas que se deseen estudiar cercanas al puerto de estudio.

2. Una vez definidas la malla o mallas de propagación con el modelo OLUCA, se debe seleccionar una matriz de propagación en 4D que intente abarcar todas las posibles combinaciones que puede adoptar el oleaje en la zona de estudio, variando los valores de altura de ola H , periodos T , direcciones θ y niveles de marea.

En el caso que se desee propagar oleaje espectral, se recomienda alimentar el modelo OLUCA con espectros teóricos tipo TMA Bouws *et al.*, (1985) al que se le aplica la función de dispersión angular propuesta por Borgman (1984). Cada espectro propagado queda definido por cinco parámetros:

H_s - Altura de ola significativa

T_p - Período de pico.

θ_m - Dirección media.

γ - Factor de ensanchamiento del pico.

σ_θ - Parámetro de dispersión angular.

De igual forma que en el caso monocromático, se asigna a cada propagación espectral, un nivel de marea.

Se recomienda que los resultados obtenidos en cada propagación se almacenen en ficheros de datos, a partir de los cuales pueden obtenerse las representaciones gráficas de iso-alturas de ola significativa, y de vectores altura de ola significativa – dirección media de propagación.

3. Tras la selección de los casos a simular, se realiza la simulación en serie de todos y cada uno de los casos diseñados, para así obtener una matriz resultante 4D para cada punto de la malla, la cual incluye los datos de altura de ola significativa, periodo de pico, dirección, y nivel de marea. Éstos están relacionados con las alturas de ola, periodos, direcciones y niveles de marea establecidos inicialmente..

4. El siguiente paso consiste en elegir los puntos objetivo. Se recomienda realizar la selección de varios puntos objetivos para zonas de especial interés tanto en el exterior como en el interior de las dársenas portuarias.
5. Con los puntos objetivo ya seleccionados, es posible realizar la propagación de la base de datos HIPOCAS desde aguas profundas, a los puntos objetivo en las inmediaciones del puerto.

Dicha propagación se realiza asignando a cada dato $(H_{Si}, T_{Pi}, \theta_i)$ de profundidades indefinidas, un dato H_{Sp}, T_{Pp}, θ_p , nivel de marea en el punto objetivo.

Para asignar los valores en el punto objetivo se construye, para cada uno de dichos puntos, una tabla de seis columnas que contiene la siguiente información:

1ª columna: H_{Sp} en profundidades indefinidas.

2ª columna: T_{Pp} en profundidades indefinidas.

3ª columna: θ_p en profundidades indefinidas.

4ª columna: Nivel del mar respecto al cero del puerto.

5ª columna: Coeficiente de propagación en el punto objetivo.

6ª columna: Ángulo de incidencia de la frecuencia de pico en el punto objetivo.

Conocido un dato H_{Si}, T_{Pi}, θ_i , y nivel de marea en profundidades indefinidas, el valor de la altura de ola significativa y de la dirección en el punto objetivo, H_{Sp}, θ_{ip} , se determina mediante un procedimiento de interpolaciones lineales en la matriz 4D.

6. Una vez propagada la base de datos hasta el punto objetivo, la determinación de los regímenes extremales, direccionales y escalares, se realiza siguiendo la misma metodología empleada en profundidades indefinidas.

Por otro lado, es necesario definir eventos de estados de mar, asociados a la onda larga resonante. Como ya se dijo en la sección anterior, a partir de barridos de frecuencias con el modelo MSP (forzado con un ruido blanco), se identifican aquellas frecuencias resonantes de especial interés.

$$F_L^* = \frac{1}{T_L^*} \quad (I.7)$$

Siguiendo el procedimiento para caracterizar los parámetros de onda larga, asociados a registros temporales de onda corta mostrado anteriormente, se obtienen las alturas de onda larga H_L^* , altura de ola significativa de onda corta H_s , y periodo de pico de onda corta T_p , asociados a cada periodo resonante obtenido con el modelo MSP.

Posteriormente para cada par de valores de onda corta (H_s , y T_p), se obtiene un espectro JONSWAP, en el cual se incluirá la energía espectral de onda larga (*set-down*), asociada a los grupos de onda corta obtenida para las distintas zonas del litoral español, siguiendo la técnica de Martín (2003).

Con esta información, se pueden generar artificialmente las series temporales de oleaje de onda corta y onda larga simultáneas, para ser utilizadas en las simulaciones numéricas con el modelo MANOLO, con el objetivo de evaluar los efectos de agitación resonantes, no lineales y transitorios, dentro y fuera de los puertos en un dominio bidimensional.

A continuación se describe el procedimiento a seguir, y posteriormente, se ilustrará con un ejemplo teórico de aplicación al caso del puerto de Lastres.

1. Se realiza un barrido de frecuencias para encontrar los coeficientes de amplificación resonantes y los periodos asociados a éstos, sobre la zona portuaria.

En este primer paso se utiliza el modelo MSP, que puede ser forzado por un ruido blanco (amplitud unitaria para todas las frecuencias), excitando de esta forma el cuerpo de agua semi-encerrado definido por las dársenas portuarias, y obteniendo así los periodos naturales de oscilación para cualquier puerto con geometría compleja y batimetría real.

Se debe recordar que el modelo MSP, al realizar un barrido de frecuencias, no considera los mecanismos de disipación de energía del flujo y en consecuencia, no asocia un valor real de amplificación para cada periodo resonante obtenido.

Para cada periodo de onda larga obtenido con el barrido de frecuencias, se obtienen los parámetros de onda corta asociados (H_s , y T_p), utilizando las relaciones empíricas que se obtengan del análisis de series temporales de superficie libre o presión medidas en campañas de campo.

En caso de no contar con datos de superficie libre o presión obtenidos en campañas de campo en la zona de estudio, se debe recurrir a los valores propuestos en la tabla I.2.

También se pueden utilizar las correlaciones entre altura de ola significativa y periodo de pico en temporales propuestas en el documento ROM 0.3-91.

2. Una vez determinada la altura de ola significativa y periodo de pico para cada periodo seleccionado del barrido de frecuencias, se procede a determinar la energía de onda larga asociada a la energía total de onda corta, a través de la metodología propuesta por Martín (2003).

La energía de onda larga asociada a la energía de onda corta es proporcional a la amplitud de *set-down* asociada a los grupos de onda corta, como sigue.

$$\sqrt{m_0^*} = [J_{m,n}^{-1}] \zeta_{ID} \quad (I.8)$$

donde

$\sqrt{m_0^*}$ es la energía de onda larga de *set-down* asociada a los grupos de onda corta, $[J_{m,n}^{-1}]$ es la función de transferencia representativa de la región marítima donde se ubica la obra, que se determina como sigue para las tres regiones del litoral español propuestas en Martín (2003), obtenidas con datos instrumentales en las boyas que se muestran a continuación, que miden sobre las profundidades que se exponen.

Región 1	Región 2	Región 3
1. Gijón (23 m)	1. Sevilla (10 m)	1. valencia (20 m)
2. Las Palmas (42 m)	2. Cádiz (22 m)	2. Ceuta (21 m)
3. Gijón 2 (43 m)	3. Gran Canaria (48 m)	3. Málaga (22 m)
4. A Coruña (50 m)	4. Tenerife (52 m)	4. Gata (35 m)
5. Bilbao (50 m)		5. Tarragona (35 m)
6. Silleiro (75 m)		6. Capdepera (45 m)
		7. Alicante (50 m)
		8. Palos (67 m)
		9. Gerona (90 m)

Para cada una de estas tres regiones se tienen las siguientes funciones de transferencia:

$$\text{Región 1} \quad [J_{m,n}^{-1}] = 104.60(0.03258\sqrt{h})^{3.2} \quad (I.9)$$

$$\text{Región 2} \quad [J_{m,n}^{-1}] = 52.40(0.04911\sqrt{h})^{3.0} \quad (I.10)$$

$$\text{Región 3} \quad [J_{m,n}^{-1}] = 35.29(0.05700\sqrt{h})^{2.93} \quad (I.11)$$

Finalmente, el valor de la amplitud del *set-down* ζ_{ID} , asociada a grupos de ondas cortas se define como:

$$\zeta_{ID} = -\frac{1}{2} \frac{g \left(\frac{H_s}{2} \right)^2}{gh - C_g^2} \left[\frac{2C_g}{C} - \frac{1}{2} \right] \quad (I.12)$$

donde

g - Aceleración de la gravedad

h – Profundidad en el punto objetivo

C – Celeridad de fase

H_s – Altura significativa de un estado de mar (seleccionada anteriormente en el punto 2)

C_g – Celeridad de grupo

Los valores de celeridad de fase y celeridad de grupo se obtienen directamente de la teoría lineal, tomando el valor de T_p de onda corta (seleccionada anteriormente en el punto 2), en la profundidad objetivo h .

$$C^2 = g \left(\frac{T_p}{2\pi} \right)^2 \quad (I.13)$$

$$C_g = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(kh)} \right) \quad (I.14)$$

- Finalmente, con los valores de H_s , T_p , H_L^* , T_L^* y $\sqrt{m_0^*}$ obtenidos, se procede a generar los casos a ser simulados con el modelo numérico MANOLO. A continuación se describe de forma general este procedimiento:

Se toman los valores de altura de ola significativa H_s y periodo de pico T_p de cada estado de mar de onda corta, para generar un espectros teórico tipo JONSWAP. Se genera un espectro JONSWAP para cada frecuencia resonante seleccionada a partir del barrido con el modelo MSP.

La suma lineal del espectro JONSWAP y la energía de onda larga $\sqrt{m_0^*}$, se puede realizar simplemente añadiendo un pulso energético que se localice

exactamente en la frecuencia de resonancia seleccionada (del ruido blanco MSP), y asignándole la amplitud de energía equivalente a $H_L^*/2$.

Otra forma de incluir la energía de onda larga en el espectro JONSWAP, es sumándole al espectro JONSWAP, un área espectral equivalente al total de la energía de onda larga obtenida $\sqrt{m_0^*}$, siempre que se conozca la forma de la distribución energética de onda larga en la zona de estudio (distribución energética y su rango de frecuencias de onda larga). Esto únicamente se puede determinar si se han realizado campañas de campo, y se cuenta con mediciones de onda corta y onda larga.

Respecto a las direcciones propagación, se debe asociar a estos espectros de onda larga y corta, las direcciones más probables de cada estado de mar. Por otro lado, estos casos se deben combinar con distintos niveles del mar, por lo menos en pleamar, nivel medio y bajamar.

Se suma linealmente la energía de onda larga obtenida $\sqrt{m_0^*}$ a dicho espectro JONSWAP de onda corta, y el resultado se emplea para alimentar al modelo numérico MANOLO a través de la obtención de las amplitudes asociadas a las energías para cada frecuencia, y su posterior aplicación directa en el algoritmo de generación sinusoidal variable en el tiempo considerando fases aleatorias que el modelo MANOLO utiliza.

El objetivo de forzar el modelo numérico con un espectro que está diseñado teóricamente, es generar artificialmente una serie temporal que obligue a la ocurrencia de episodios resonantes en las dársenas y periodos de resonancia seleccionados, y así como también poder evaluar numéricamente los efectos no lineales de transferencia de energía de onda corta a onda larga, los efectos transitorios que ocurren bajo episodios resonantes, los complejos patrones bidimensionales de oscilación dentro de las dársenas, las magnitudes reales de las amplificaciones resonantes en las dársenas, y los porcentajes de la energía total del espectro de entrada que se transmiten hacia frecuencias de onda larga para diferentes espectros forzadores y configuraciones

portuarias (cambio en los elementos de protección, ampliación y mejoras de los puertos).

Cabe mencionar que el modelo numérico MANOLO debe de ser calibrado previamente con los datos de las campañas de campo, para asegurar la validez de los eventos simulados numéricamente.

Emplear este espectro artificialmente generado, no garantiza la ocurrencia de eventos resonantes durante las simulaciones numéricas, debido a que los procesos de generación, y liberación de la onda larga vinculada a onda corta y a grupos, no necesariamente obedecen a procesos físicos de *set-down* en todos los casos. Es posible que exista otros mecanismos de generación y liberación de onda larga no contemplados en esta metodología, como el *surf-beat* que ocurre en playas, generación de onda larga por movimiento cíclico del punto de rotura, liberación de onda larga por interacción con estructuras portuarias, o liberación de la onda larga por interacciones no lineales con el fondo. No es suficiente con conocer los tipos de elementos forzadores que la metodología es capaz de arrojar, se debe de considerar el tipo de estudio que se va a efectuar, a fin de elegir aquellos elementos forzadores óptimos que alimentarán a los modelos numéricos, para que finalmente obtengan los datos exactos que cada estudio requiere.

Finalmente, se debe de mencionar que los elementos forzadores seleccionados para el estudio portuario, en ocasiones, no pueden ser aplicados directamente a los modelos numéricos, por lo que se requiere un trabajo que se encargue de pre-procesar los datos de entrada, para adecuarlos a los formatos que cada modelo exige.

En el siguiente apartado se muestra la parte final de la metodología integral para la realización de estudios de agitación y resonancia portuaria, que consiste en la utilización de las herramientas numéricas propuestas en este documento.

I.4 ESTRATEGIAS Y RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE PROPAGACIÓN EN PUERTOS

La tercera parte de la metodología para la realización de estudios de agitación y resonancia portuaria, presenta una serie de recomendaciones a ser tenidas en cuenta a la hora de aplicar las herramientas numéricas propuestas.

Cabe resaltar que, los procedimientos y recomendaciones recogidas en esta sección, son meramente orientativas y preliminares, y su objetivo es guiar al usuario acerca de la cómo debe de aplicar de forma adecuada los modelos de propagación disponibles en el ámbito portuario.

Actualmente contamos con una amplia experiencia desde el punto de vista ingenieril, en la aplicación de modelos de tipo parabólicos tipo OLUCA, y elípticos tipo MSP. No obstante, debemos ser conscientes de que a día de hoy, la experiencia en la aplicación de modelos no lineales, dispersivos y transitorios como los basados en las ecuaciones de Boussinesq es limitada.

A todo esto hay que añadir una serie de limitaciones en cuanto a tiempos de ejecución, los cuales actualmente plantean series restricciones tanto en el diseño de dominios computacionales extensos, como para la generación de largas series de oleaje.

Debido a estas limitaciones, se plantea una estrategia que combina los modelos de propagación OLUCA, MSP y MANOLO, con el fin de optimizar los tiempos de ejecución y la selección del número de eventos a simular, garantizar la máxima fiabilidad en los resultados y optimizar los tiempos que emplea un estudio de agitación y resonancia en puertos.

Con el fin de mejorar la estrategia para realizar estudios hidrodinámicos en el ámbito portuario, se necesita conocer *a priori* las características y alcances propios del problema en cuestión, aspecto que fue planteado en la sección anterior (véase tabla I.2), en cuanto a las dimensiones espaciales, los procesos a ser evaluados, las características de los elementos forzadores, y la complejidad en la geometría portuaria.

Tal y como se mencionó anteriormente, este procedimiento propone cuatro herramientas matemáticas de trabajo, para llevar a cabo el análisis y estudio integral de agitación y resonancia portuaria, que son: (1) formulaciones analíticas para configuraciones portuarias sencillas, (2) el modelo parabólico de oleaje OLUCA que se basa en las ecuaciones de la pendientes suave (*parabolic mild slope equation*), (3) el modelo elíptico de agitación lineal basado en las ecuaciones de la pendiente suave (*elliptic mild slope equation*), y (4) el modelo no lineal de agitación basado en las ecuaciones modificadas de Boussinesq (*modified Boussinesq equations*), modelo MANOLO.

Estos modelos se aplican bajo circunstancias diferentes, dependiendo de sus hipótesis y limitaciones y de los estudios particulares a realizar. En la tabla I.4 se presenta un resumen de las características, datos de entrada, y datos de salida que ofrecen los tres modelos de propagación que este procedimiento propone.

A continuación, se describe con mayor detalle, cómo y cuándo deben de ser aplicados cada una de las cuatro vías de análisis propuestas, incluyendo algunas recomendaciones acerca de su uso.

	Características generales	Datos de entrada	Datos de salida	Objetivos que cubre
OLUCA	<p>Aplicable a zonas exteriores fuera del puerto. Aproximación parabólica (<i>mild slope eq.</i>) Modelo no lineal, dispersivo y no transitorio. Sin reflexión hacia atrás (límites de ángulo de propagación $\pm 60^\circ$). Disipación por rotura y fricción en el fondo. Mallas rectangulares en diferencias finitas. Tiempos de ejecución muy cortos. No permite la interacción onda larga/onda corta simultáneamente. Modelo estacionario.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Batimetría general y de detalle. Oleaje monocromáticos (H, T, θ). Oleaje irregular definido con un espectro TMA y función de distribución direccional ($H_s, T_p, \theta, \gamma, \sigma$). 	<ul style="list-style-type: none"> Oleaje monocromático en cada punto de la malla, (H, T, θ). Oleaje irregular (espectro direccional) en cada punto de la malla. (H_s, T_p, θ). Superficies libres y diagramas de fases. 	<ul style="list-style-type: none"> Aproximar los oleajes desde aguas profundas hasta las cercanías de los puertos. Crear las condiciones de contorno de oleaje para alimentar a los modelos de agitación y resonancia en puertos. Permite propagar datos de oleaje del exterior de forma rápida y fiable.
MSP	<p>Modelo elíptico no transitorio, basado en la ec. de la <i>mild slope</i> Lineal y dispersivo. Estacionario. Aplicable a estudios de agitación en dársenas portuarias. Requiere definir todas las condiciones de contorno, (reflejantes y parcialmente reflejantes). Tiempo de ejecución medio (mayores que con el OLUCA). Incluye disipación por fondo y rotura. Malla no estructurada en elementos finitos. No permite la interacción onda larga/onda corta.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Definición de la geometría en planta del puerto. Batimetría de detalle. Coefficientes de reflexión en los contornos. Malla en elementos finitos. Ondas monocromáticas (H, T, θ). Oleaje irregular definido con un espectro TMA y función de distribución direccional ($H_s, T_p, \theta, \gamma, \sigma$). Barrido en un rango de frecuencias (ruido blanco). 	<ul style="list-style-type: none"> Oleaje monocromático (H, T, θ), y velocidades horizontales $U-V$ en cada punto de la malla. Oleaje irregular (espectro direccional) en cada punto de la malla. (H_s, T_p, θ_m). Coefficiente de amplificación y periodos naturales de oscilación resonante. 	<ul style="list-style-type: none"> Identificación rápida de los periodos naturales de oscilación de las dársenas de los puertos. Patrones de agitación para oleajes monocromáticos y espectrales. Útil para el prediseño de dársenas y estructuras portuarias. Análisis de sensibilidad frente a variaciones de elementos forzadores y niveles de marea.
MANOLO	<p>Modelo basado en las ecuaciones modificadas de Boussinesq. Tiene en cuenta la no linealidad y dispersividad del oleaje. Modelo transitorio aplicable a dársenas portuarias. Requiere definir todas las condiciones de contorno, (absorción, reflexión y batimetría). Incluye los mecanismos de disipación por rotura, fricción en el fondo y mezcla turbulenta asociada a la rotura. Malla no estructurada en elementos finitos. Tiempo de ejecución elevado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Geometría en planta del puerto. Batimetría de detalle en las inmediaciones portuarias. Definición de zonas de absorción de las ondas salientes del dominio. Series temporales de ondas monocromáticas y sus combinaciones lineales ($H(t), T(t), \theta(t)$). Oleaje irregular mediante un espectro JONSWAP ($H_s, T_p, \theta, \gamma, \sigma$), o JONSWAP incluyendo onda larga. Series temporales de superficie libre, velocidades $U-V$, datos de campo, o ajuste de datos instrumentales (boyas). 	<ul style="list-style-type: none"> Series temporales de oleaje monocromático, irregular, presión y velocidades $U-V$. ($H(t), T(t), \theta(t), U-V(t), P(t)$) Mapas bidimensionales de superficie libre, velocidad presión, en superficie libre, perfil medio (profundidad α), y fondo. 	<ul style="list-style-type: none"> Obtiene la evaluación temporal de la superficie libre, velocidades y presión en cualquier punto de la malla, combinando onda corta/onda larga simultáneamente. Tiene en cuenta los efectos no lineales y las interacciones entre componentes de energía. Permite simular y analizar eventos específicos, casos resonantes o series de oleaje obtenidas en campo. Estudio de los posibles efectos de acoplamiento geométrico entre dársenas. Permite promediar o integrar en el tiempo las variables de $H, U-V, P$ en cualquier punto dentro del dominio.

Tabla I.4 Relación general de modelos numéricos utilizados en estudios portuarios, datos de entrada y salida, y objetivos que cubren.

I.4.1 Identificación analítica de los modos naturales de oscilación en puertos con geometrías simples

Las dársenas abiertas ya sean puertos o bahías, son susceptibles a la acción de forzamiento (ondas infragravatorias, tsunamis, y ondas generadas por cambios atmosféricos), que pueden llegar a generar oscilaciones importantes, que generalmente se deben de evaluar en el trabajo de pre-diseño de cualquier instalación portuaria.

En la mayoría de los casos, la geometría de los puertos se puede aproximar a una forma idealizada a través del uso de formas geométricas simples tales como cuadrados, rectángulos o círculos, con fondos batimétricos homogéneos y constantes, y para los que a través de técnicas analíticas sencillas, se pueden determinar sus respuestas de oscilación aproximadas.

Estas aproximaciones, aunque muy simples, permiten al ingeniero obtener una primera estimación del orden de las frecuencias de resonancia, como paso previo para el análisis y evaluación de los efectos de agitación y resonancia con los modelos numéricos.

Para evaluar la respuesta de oscilación en un cuerpo de agua con geometría simple, se recomienda aislar cada dársena de manera independiente y aplicar la siguiente expresión que relaciona el periodo de oscilación con la longitud de una dársena rectangular abierta en unos de los lados.

$$T_n = \frac{4l}{(1 + 2n)\sqrt{gh}} \quad (I.15)$$

donde

T_n – Periodo de oscilación del cuerpo de agua (s)

l – Longitud mayor del rectángulo (m)

n – Modo de oscilación

g – aceleración de la gravedad (m/s^2)

h – Profundidad (m)

La expresión siguiente indica que el modo fundamental de oscilación resonante ($n=0$) ocurre cuando se cuenta con un cuarto de la longitud de onda incidente dentro de la dársena.

$$T_0 = \frac{4l}{\sqrt{gh}} \quad (\text{I.16})$$

Con una técnica análoga se recomienda evaluar la velocidad máxima de la partícula de agua en cada nodo, para una oscilación estacionaria dentro del cuerpo de agua como sigue, obtenido de Sørensen (1986).

$$V_{\max} = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (\text{I.17})$$

donde

V_{\max} – Velocidad máxima en cada nodo de oscilación

H – Altura de onda estacionaria dentro de la dársena

Si se generaliza el problema para un amplio rango de anchuras relativa de las dársenas (b/l), y anchuras relativas de la bocana (w/l), se pueden obtener fácilmente las amplificaciones para los valores del primer y segundo modo de oscilación resonantes para diferentes longitudes relativas de los puertos (kl), donde b es el ancho de la dársena, w el ancho de la bocana y k el número de onda. Esto se puede verificar en la gráfica mostrada en Raichlen & Lee (1992).

De igual forma se recomienda revisar las tablas propuestas por Zelt (1986), obtenidas a partir de ensayos de laboratorio, que determinan la respuesta para el primer y segundo modo resonante para variaciones geométricas en planta y perfil de dársenas abiertas, mostrada en la tabla I.5.

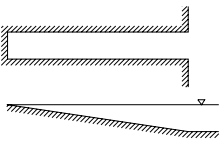
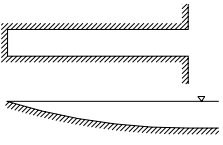
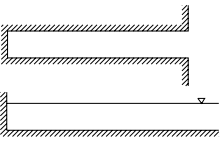
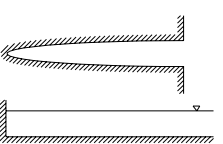
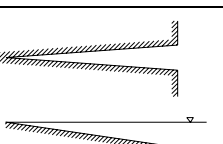
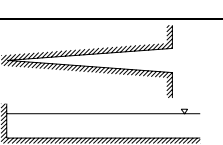
Geometría	Primer modo resonante		Segundo modo resonante	
	kl	Coef .Amp	kl	Coef .Amp
	1.089	16.43	2.565	11.45
	1.229	10.96	3.177	7.61
	1.315	7.81	4.182	2.68
	1.696	8.12	4.559	4.32
	1.757	21.85	3.280	32.18
	2.050	8.50	4.926	6.19

Tabla 1.5 Respuesta resonante para dársenas idealizadas con geometrías simples, Zelt (1986)

Finalmente, se debe de tener en cuenta que la técnica analítica para la determinación de los periodos resonantes, y amplificaciones en dársenas con geometrías sencillas, no contempla las pérdidas energéticas por fricción en los contornos, por lo que los valores de amplificación siempre son sobre-estimados.

Con la técnica analítica de identificación de los modos de oscilación naturales de dársenas semi-encerradas, no se puede cuantificar los efectos que presentan las oscilaciones transversales en el plano bidimensional que se presentan en dársenas que presentan geometrías asimétricas.

Existen otros estudios que se encargan de evaluar las oscilaciones resonantes en puertos simples, como presenta Lee (1969) para puertos circulares, Zelt (1986); Zelt & Raichlen (1990), para puertos con geometrías arbitrarias con base en la superposición de geometrías simples.

Adicionalmente Kofoed-Hansen *et al.* (2000), presentan una relación analítica para determinar los modos fundamentales de oscilación para dársenas con geometrías sencillas determinada a través de la combinación de las ecuaciones en aguas reducidas (*shallow water equations*) y las ecuaciones de momentum y conservación de masa.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g \cdot h \cdot w}{S \cdot l}} \quad (\text{I.18})$$

donde

f – frecuencia fundamental de oscilación (1/s)

g – aceleración de la gravedad (m/s²)

h – calado medio de la dársena (m)

w – anchura media de la dársena (m)

l – Longitud media de la dársena (m)

S – Superficie de la dársena (m²)

I.4.2 Propagación de oleaje modelo parabólico OLUCA

Normalmente los oleajes en profundidades indefinidas o en puntos HIPOCAS, se encuentran a una distancia de la costa entre los cientos de metros y los kilómetros; dependiendo de la plataforma continental.

Debido a las limitaciones en cuanto a tiempos de ejecución anteriormente planteadas por los modelos de agitación en la zona del puerto (MSP y MANOLO), es necesario aproximar el oleaje mediante un modelo rápido y preciso, que permita incluir las distintas definiciones del oleaje.

Por esta razón, se propone aplicar el modelo parabólico OLUCA, que ha sido brevemente descrito en la tabla I.3.

El modelo OLUCA trabaja sobre una malla rectangular en diferencias finitas, y al ser un modelo parabólico, es más rápido en cuanto a tiempos de ejecución. Sin embargo, el modelo presenta ciertas limitaciones como es la orientación de las mallas, la rigidez de los contornos, y la limitación en los grados de reflexión de los trenes de oleaje.

Los detalles de aplicación del modelo OLUCA se recogen en el manual de usuario MOPLA 2.0 el cual se encuentra disponible en la siguiente dirección electrónica:

www.smc.unican.es

En el capítulo 6 de dicho manual, se recoge una metodología paso a paso que permite definir el número de mallas a utilizar, su orientación, casos de entrada, y obtención de resultados del modelo OLUCA.

I.4.3 Análisis lineal, modelo MSP

Existe un gran número de puertos reales que generalmente presentan geometrías complejas, múltiples dársenas interconectadas, canales de navegación, múltiples bocanas, etc. Por ello el análisis simplificado presentado anteriormente para geometrías sencillas, no se puede llevar a cabo con éxito.

Cuando esto ocurre, el técnico de costas debe recurrir a la utilización de modelos numéricos que le permitan simular las oscilaciones bidimensionales en planta, y que además sean capaces de contemplar diferentes elementos forzadores y disipadores.

La aplicación del modelo MSP, basado en la ecuación elíptica de la pendiente suave (*mild slope equation*), permite ahondar en el conocimiento de los valores de frecuencia y amplitud de las agitaciones lineales que se presenten dentro y fuera de los puertos, ya sea para situaciones reales con la imposición de forzamientos medidos en campo o

laboratorio, o bien, con forzamientos artificiales impuestos deliberadamente con el fin de obtener una respuesta portuaria específica.

La utilización del modelo MSP es altamente recomendable para acometer los estudios de agitación portuaria, tanto para la obtención de parámetros de pre-diseño portuario, como para establecer las bases para la aplicación de modelos avanzados.

El modelo numérico MSP cuenta con la ventaja de permitir obtener resultados de forma rápida y sencilla, para un amplio abanico de situaciones de oscilación y configuraciones portuarias sobre batimetrías reales.

No obstante, comparado con el modelo parabólico es más lento. Por lo tanto, se recomienda aproximar el modelo parabólico hasta la zona de aguas intermedias y con los resultados que arroje éste último, alimentar el modelo MSP.

Se propone la utilización del modelo MSP como parte de las herramientas numéricas consideradas en la metodología integral de estudio de agitaciones portuarias, y especialmente para el trabajo de pre-identificación de las frecuencias naturales de oscilación de cuerpos de agua con geometrías complejas.

No es objeto de este apartado presentar una descripción del modelo numérico, sus ecuaciones y esquemas numéricos de resolución. Para verificar esta información se remite este documento a GIOC (1999) y GIOC (2003).

En esta sección se presentan una serie de recomendaciones que servirán de guía al ingeniero que desea llevar a cabo un análisis numérico de un puerto, permitiéndole establecer el dominio de estudio, determinar los parámetros de entrada, explotar las capacidades del modelo, y conocer sus límites y rangos de aplicación.

a) Recomendaciones sobre el diseño del dominio numérico, batimetría y condiciones de contorno

El diseño de las simulaciones a realizar con el modelo MSP parte de la definición de un dominio numérico de trabajo, para el que es necesario establecer dimensiones y características propias de cada contorno, sobre una base batimétrica preestablecida.

Tal como se dijo al comienzo de este capítulo, se debe elegir una batimetría que presente dimensiones lo suficientemente grandes para permitir la disposición de dominios numéricos extensos, y al mismo tiempo, cuidando no exceder los límites numéricos en cuanto a la cantidad de nodos a evaluar dentro del dominio.

Este equilibrio se alcanza de manera empírica, únicamente a través de un trabajo iterativo de ensayo-error que involucra diversas variables como son: el dimensionamiento del dominio, los nodos batimétricos, el detalle de los elementos portuarios y las características propias de los elementos forzadores.

Definir adecuadamente las dimensiones finales del dominio numérico es una tarea específica que depende de cada estudio a realizar. No obstante, siempre se debe dimensionar el dominio en función del orden de magnitud de las longitudes de onda involucradas en cada caso, para posteriormente poder delimitar un dominio numérico adecuado.

Las longitudes de onda que se deben de considerar pueden ser dos: la longitud de onda para el caso monocromático en la zona de incidencia, y la longitud de onda asociada al periodo de pico en la zona de incidencia para forzamientos espectrales. Para estos dos casos, las dimensiones del dominio deben de ser capaces de contener al menos 1.5 veces la longitud de onda representativa seleccionada para onda corta, y 0.5 veces la longitud de onda representativa para onda larga ($T > 30$ s).

Se recomienda que el dominio numérico que se diseñe para las simulaciones con el modelo MSP, coincida en su parte inicial con la localización espacial de los forzamientos a utilizar (sensores utilizados en campañas de campo, boyas, malla de

datos HIPOCAS, malla de resultados del modelo OLUCA), y llegue hasta el dominio portuario, abarcando toda la zona de interés dentro y fuera de los puertos.

Se recomienda establecer que un mínimo de 10 a 15 nodos definan las longitudes de onda involucradas en cada simulación en el caso que se utilicen ondas monocromáticas como elemento forzador.

En el caso de utilizar oleaje irregular como elemento forzador, se debe de garantizar que al menos de 10 a 15 nodos definan la longitud de onda correspondiente a la frecuencia máxima espectral (menor periodo de interés). Normalmente un análisis de agitación pueden interesar periodos en el rango de las ondas cortas de $4s < T < 30s$ y en el rango de las ondas largas de $30s < T < 600s$.

En algunas ocasiones, cumplir con las dimensiones de una malla diseñada para un forzamiento de oleaje irregular, implica superar los límites prácticos de dimensiones del dominio numérico, por esto, se recomienda una revisión previa de las características espectrales a fin de eliminar las frecuencias más altas del espectro incidente, que posiblemente no suponen un cambio significativo en la energía total del espectro ($T < 4s$). Se recomienda realizar el truncamiento del espectro para las frecuencias más altas, siempre y cuando este tratamiento no sea determinante en la calidad de los resultados finales.

Para optimizar el diseño de la malla numérica, se recomienda revisar con detalle todos y cada uno de los nodos que delimitan el contorno, e identificar aquellos nodos que definen con gran detalle ciertas zonas que pueden resultar conflictivas en el mallado numérico (morros de diques, esquinas, zonas de bajos batimétricos). Los elementos triangulares en dichas zonas, pueden llegar a adoptar geometrías descompensadas (triángulos muy escalenos) que generalmente incentivan fuertes inestabilidades en el esquema numérico espacial de resolución del modelo. Para minimizar estos efectos se recomienda la eliminación del exceso de nodos en las zonas mencionadas anteriormente.

En cuanto a la corona que define el contorno de absorción de las ondas que salen del dominio, se recomienda que coincida con el punto final de las mallas del modelo OLUCA, para así alimentarse de manera directa de los datos que arroje el modelo parabólico.

b) Recomendaciones sobre los elementos forzadores en las simulaciones

El modelo numérico MSP, permite la simulación de oscilaciones portuarias que involucren elementos forzadores lineales, y ondas cortas dispersivas y ondas largas no dispersivas de forma independiente.

Se debe de conocer las características en cuanto a la linealidad y dispersividad de los forzamientos a utilizar en las simulaciones con el modelo MSP, ya sea que se utilicen datos de oleaje real, datos instrumentales o datos históricos HIPOCAS, para asegurar que el modelo se esta utilizando dentro de sus límites de aplicación.

Los parámetros adimensionales que se deben de revisar son la no linealidad, expresada mediante el peralte de onda $\varepsilon = H/L$ y/o la altura relativa de la onda $\delta = H/h$ y el parámetro representativo de la dispersividad de las ondas, expresado mediante la profundidad relativa $\mu = h/L$ ó $\mu = kh$, donde

H - Altura de onda

L - Longitud de onda

k -Número de onda ($k = 2\pi/L$)

h - Profundidad

Con estos parámetros se obtiene el número de Ursell de los elementos forzadores, $Ur = \delta/(kh)^2$, que permite clasificar los diferentes tipos de movimiento del flujo.

Se debe de considerar los efectos dispersivos del flujo cuando $h/L > 1/8$ ó $kh > 0.78$.

Cuando el flujo se propaga hacia aguas reducidas $h/L < 0.05$, los efectos dispersivos son menores debido a que cuentan con celeridades menores y la influencia de la profundidad es menor. Por esto, para las ondas largas, los efectos dispersivos son despreciables.

Para identificar si el flujo de estudio es no lineal o lineal, se utiliza el número de Ursell. Si éste presenta valores de $Ur \ll 1$ se tienen situaciones en donde la no linealidad es despreciable y la teoría lineal de Stokes es la que rige, mientras que para un número de Ursell $Ur \gg 1$ se tiene un régimen no lineal de ondas.

Se recomienda considerar si los procesos del flujo a modelar incluyen características dispersivas y no lineales en diferentes puntos del dominio, utilizando los valores de altura de ola significativa, periodo de pico y profundidad en cada punto.

c) Recomendaciones acerca de los mecanismos de disipación de energía

Se debe de recordar que el modelo MSP contempla como mecanismos disipadores de energía de las oscilaciones dentro de puertos, la rotura de oleaje y la fricción en el fondo, así como la absorción en contornos parcialmente reflejantes. Las amplitudes en las oscilaciones dentro y fuera de los puertos se deben de calibrar con dicho factor.

Se recomienda que una vez diseñado el dominio numérico, y elegidos los mecanismos forzadores a simular, se determine el factor de fricción por fondo que se desea establecer, en función de datos reales obtenidos en campo o en laboratorio, o bien, si no se cuenta con dicha información, en función del tipo de fondo establecido para cada zona de estudio, tomando los valores del coeficiente de Chezy recomendados en la literatura para diferentes fondos.

$$C_e = 18 \log \left(\frac{12h}{ks} \right) \quad (I.19)$$

$$ks = 3D_{90}$$

donde

D_{90} es el parámetro de diseño obtenido en el análisis de la muestra de sedimento

Por otro lado, se debe definir adecuadamente la reflexión parcial en los contornos de las dársenas, particularmente para aquellas simulaciones asociadas a agitación portuaria (onda corta), ya que la presencia de diques de escollera, contornos rocosos, playas y elementos aislados que presenten cierta porosidad, son diseñados para minimizar los efectos de reflexión dentro de las dársenas.

Actualmente no existe ningún catálogo que ofrezca los porcentajes de reflexión para los diferentes tipos de contorno existentes. Sin embargo, se recomienda que de forma general, se utilicen los siguientes rangos de reflexión como datos de partida para estudios de agitación portuaria con el modelo MSP.

- Dique de escollera, de 70% a 80 % de reflexión
- Pared vertical dentro de las dársenas portuarias, de 90% a 100% de reflexión
- Playa disipativa, de 20% a 30% de reflexión.
- Playa reflejante, de 30% a 40% de reflexión.
- Acantilado o pared rocosa, de 80% a 90% de reflexión.
- Elementos prediseñados para minimizar la reflexión, según el fabricante.
- Contornos 100% reflejantes para la identificación de las frecuencias de oscilación resonantes.

d) Recomendaciones acerca de la identificación de las frecuencias de oscilación resonantes

Posiblemente la aplicación más difundida de los modelos bidimensionales de agitación que se basan en las ecuaciones de la pendiente suave, es aquella relacionada con la evaluación de las frecuencias resonantes de los puertos reales.

De manera especial, se cuenta con una amplia experiencia en este ámbito de aplicación, del modelo MSP, logrando conseguir resultados satisfactorios tanto para el diseño de

puertos reales, el apoyo en la mejora de instalaciones portuarias existentes, y la realización de estudios puramente de investigación académica.

Una de las grandes ventajas de poder identificar los periodos resonantes de un cuerpo de agua con geometrías complejas, sobre batimetrías reales, es que no se requiere conocer *a priori* las características de los posibles elementos forzadores que actúan sobre cada puerto, ya que la técnica se basa en simplemente inducir un forzamiento artificial de amplitud constante que abarca un amplio rango de frecuencias en el rango de las ondas largas.

Este forzamiento artificial en forma de ruido blanco, permite al técnico identificar los periodos de oscilación del cuerpo de agua y contrastarlos con los posibles elementos forzadores existentes en la zona de estudio, a fin de evitar la coincidencia de aquellos periodos resonantes que desencadenarían sobre-amplificaciones dentro de las dársenas de los puertos.

Aparentemente, la determinación de los periodos resonantes para un sistema portuario es una tarea simple. Sin embargo, existen diversas recomendaciones que se deben de seguir para interpretar adecuadamente los resultados que se obtengan.

En primer lugar, y después de haber definido un dominio numérico adecuado, se debe de elegir el instante de marea que va a ser simulado, debido a que la localización de los periodos naturales de oscilación dentro de las dársenas, dependen de manera importante del nivel de la marea seleccionado en cada simulación. Se recomienda que al menos se realice el análisis de identificación de los periodos resonantes de los puertos, para varios instantes de marea, bajamar, pleamar y media marea, debido a que las frecuencias resonantes dependen en gran parte del volumen del cuerpo de agua delimitado por cada dársena. Un periodo resonante puede moverse de forma importante hacia valores superiores o inferiores, dependiendo del nivel de marea elegido, lo cual puede llegar a ser determinante en la estimación de los posibles episodios de resonancia que el puerto puede llegar a experimentar.

La determinación de las frecuencias resonantes con el modelo MSP se debe realizar imponiendo una condición de reflexión total (100%) en cada uno de los contornos del

dominio, para favorecer de esta manera el confinamiento de la energía de onda larga dentro del puerto y la generación de sistemas de oscilación estacionarios.

El factor de respuesta de las dársenas portuarias que se obtiene del modelo MSP presenta coeficientes de amplificación con valores generalmente sobre-estimados (superiores a 10), debido a que el modelo no contempla los mecanismos de disipación de energía por fricción en los contornos y fondo, por lo que únicamente un trabajo previo de calibración con datos de campo y/o laboratorio, ofrecería resultados realistas en la evaluación cuantitativa de las amplificaciones resonantes.

Sin embargo, los resultados que se obtienen con el modelo MSP forzado con un barrido de frecuencias, permite al especialista identificar las frecuencias resonantes para cada modo de oscilación natural de las dársenas, localizar en el plano bidimensional los patrones de oscilación generales, y la visualización de los nodos y anti-nodos que se generan para cada frecuencia resonante, suponiendo ésto una poderosa herramienta de pre-diseño de geometrías portuarias.

En cuanto a los sensores para medir las respuestas de cada dársena, se recomienda la colocación de al menos un sensor numérico en cada una de las esquinas de cada dársena portuaria próximo a muelles, y en caso de contar con dársenas interconectadas, se recomienda disponer sensores en diferentes puntos a lo largo de las paredes de las mismas.

Como ya se mencionó anteriormente, esta técnica es de gran utilidad para identificar los periodos resonantes dentro de puertos reales, y permite al ingeniero de costas establecer los parámetros de pre-diseño de un puerto y evitar los posibles eventos resonantes que se pueden llegar a presentar.

Adicionalmente, identificar a priori las frecuencias resonantes, permite al usuario diseñar campañas de campo y determinar eventos de estados de mar que combinen onda corta y onda larga, para ser estudiados más adelante con modelos transitorios no lineales como el modelo MANOLO.

e) **Comentarios sobre las limitaciones y aplicaciones del modelo numérico MSP**

Como se mencionó anteriormente, el modelo MSP para onda larga no contempla los procesos dispersivos y no lineales de las ondas de superficie, siendo incapaz de gestionar las transferencias energéticas que sufren las componentes frecuenciales de las ondas, y se ve limitado en las características no lineales del flujo.

Además, se debe de contemplar que el modelo MSP no tiene en cuenta los posibles efectos transitorios que se presentan en las oscilaciones portuarias, debido a que es un modelo que resuelve la fase de la onda pero estacionario, por lo que no es capaz de ofrecer información temporal sobre la resonancia ni de los posibles acoplamientos que se presentan entre las dársenas.

En la tabla I.4 se describen algunos estudios portuarios que pueden ser llevados a cabo con el modelo MSP.

I.4.4 Análisis no lineal, modelo MANOLO

El modelo numérico avanzado de agitación portuaria MANOLO, se propone como una herramienta importante dentro de la metodología de estudio integral de agitación y resonancia portuaria, y ha sido descrito con detalle en GIOC (2003).

De igual forma, en GIOC (2003), se han mostrado las capacidades, comportamiento, y alcances que muestra el modelo numérico MANOLO, para realizar con éxito estudios de agitación portuaria y evaluar los efectos de agitaciones resonantes.

El modelo se basa en las ecuaciones modificadas de Boussinesq (*modified Boussinesq equations*), inicialmente propuestas por Nwogu (1993), y posteriormente implementadas por la Universidad de Cantabria.

Se puede considerar al modelo MANOLO como un laboratorio numérico, capaz de complementar los trabajos en laboratorio sobre agitación portuaria, que generalmente se

ven limitados por equipos de medición, instalaciones o costes elevados. De la misma forma, el modelo numérico se puede utilizar como un complemento de estudio de fenómenos de agitación portuaria evaluados con campañas de campo.

Se trata de un modelo avanzado, que en forma general es de difícil aplicación, ya que normalmente requiere establecer un trabajo previo de selección de todos los parámetros físicos, datos de partida, y condiciones geométricas iniciales, que son necesarios para una adecuada utilización. Dicho trabajo en ocasiones puede tornarse complejo, sobre todo si no se cuentan con una guía o recomendaciones al respecto.

Este apartado recoge algunas de las recomendaciones técnicas y reglas de buena práctica que se han recabado a lo largo del trabajo y utilización del modelo numérico MANOLO.

La primera gran recomendación para el uso y aplicación del modelo numérico MANOLO, es realizar simulaciones numéricas previas con el modelo MSP, para así establecer las primeras dimensiones en el dominio numérico, elegir batimetrías y determinar los posibles puntos de medición de especial interés.

El modelo MSP y el modelo MANOLO coinciden y comparten gran parte del trabajo de preparación del dominio computacional, la geometría de los contornos, y el establecimiento de una batimetría adecuada. Por esto se recomienda que el trabajo previo con el modelo MSP sirva de legado, y establezca el punto de arranque para aquellos estudios numéricos que se encarguen de simular condiciones de agitación en puertos reales.

Es importante mencionar que el modelo numérico MANOLO es una herramienta con una alta capacidad numérica de generación de información en el tiempo, que permite evaluar las características no lineales, y dispersivas del flujo, en dominios bidimensionales y a lo largo del tiempo, siendo capaz de considerar la transferencia energética entre componentes frecuenciales, tales como la generación de ondas largas vinculadas a grupos, su liberación, la generación de armónicos de orden superior, y evaluación de sub-armónicos. Sin embargo, sin una adecuada puesta en marcha, y calibración, el modelo simplemente podría dar lugar a conclusiones equivocadas.

A continuación, se presentan las recomendaciones mencionadas, en la búsqueda constante de minimizar el tiempo de diseño de las simulaciones numéricas y obtener resultados numéricos fiables.

a) Recomendaciones sobre el diseño del dominio numérico, zona de generación y zona de absorción de energía hacia el exterior

Se recomienda que el dominio numérico a utilizar en el modelo MANOLO sea representativo de las longitudes de onda involucradas en cada simulación. Generalmente, el dominio utilizado con el modelo MSP, ofrece un buen punto de partida para el diseño del dominio numérico del modelo MANOLO.

A diferencia del modelo MSP, el modelo MANOLO requiere una zona de generación de ondas situada en el interior del dominio, con unas dimensiones que dependen directamente del forzamiento a simular. Por esto, antes de establecer los límites del dominio numérico, se recomienda calcular las dimensiones del área de generación y en función de éstas, considerar posteriormente el dominio numérico definitivo.

Para establecer la anchura de la zona de generación se debe aplicar la siguiente relación inicialmente propuesta por Wei *et al.* (1999), para posteriormente verificar si la anchura obtenida cubre al menos 15 nodos por longitud de la onda incidente a utilizar, en caso contrario, se recomienda aumentar el valor de la anchura.

$$W = \delta \left(\frac{L}{2} \right) \quad (I.20)$$

donde

W – Semi-ancho de la zona de generación

δ - factor de escala en función del límite frecuencial de las ondas a generar

L – Longitud de onda representativa

Si se trata de una onda monocromática, la longitud representativa de la onda es única y por tanto el ancho de la zona de generación se determina directamente. En el caso de utilizar oleaje irregular, se recomienda la elección de una longitud representativa de la serie completa, tomando, por ejemplo, el valor del periodo de pico del espectro o el periodo medio de la serie de ondas.

El factor δ toma valores entre 0.3 y 0.5 si el rango de frecuencias de las ondas incidentes se encuentra comprendido entre $f > 1 \text{ min}^{-1}$ ($T = 1.66667 \times 10^{-2} \text{ s}$) En caso contrario, el factor δ adoptará el rango de valores de 0.03 a 0.05.

Ya habiéndose determinado la anchura del área de generación, estas recomendaciones establecen que la longitud de dicha zona se asigne en función de las dimensiones del dominio computacional, y en particular del puerto de estudio, ya que las ondas generadas deben de crear un frente con una longitud suficiente para abarcar la totalidad de la zona de estudio.

La dirección del área de generación se determina teniendo en cuenta la dirección predominante del estado de mar incidente. En el caso de disponer de datos medidos en campo, se recomienda que el centro del área de generación coincida con la posición exacta del sensor utilizado en las campañas de campo, del cual se extraen el forzamiento a utilizar en las simulaciones numéricas.

Una vez establecida el área de generación y su posición, se procede a establecer los límites del dominio numérico, que deben abarcar desde la zona portuaria de estudio, hasta un punto que sobrepase totalmente el área de generación y se extienda hasta el punto inicial en donde se establecerá el comienzo de la zona de absorción de energía hacia el exterior.

Al igual que el modelo MSP, el dominio numérico del modelo MANOLO debe contar con una definición nodal de al menos 15 a 20 nodos por longitud de onda, en función de la frecuencia máxima involucrada en las simulaciones.

Se recomienda que la longitud radial de la zona de generación sea de al menos 2 ó 3 veces la longitud de onda para el periodo representativo seleccionado del registro de ondas incidentes, con una definición de al menos 5 nodos por longitud de onda.

b) Recomendaciones sobre la elección y tratamiento del forzamiento

El modelo MANOLO permite trabajar con diferentes tipos de teorías de onda, como son las ecuaciones lineales y no dispersivas (onda larga lineal), ecuaciones no lineales y no dispersivas (onda larga no lineal), y las ecuaciones débilmente no lineales y débilmente dispersivas (Nwogu, (1993)), que se deben de elegir en función del tipo de forzamiento a utilizar en cada simulación o de la respuesta esperada.

Antes de realizar cualquier simulación con el modelo MANOLO, y al igual que con el modelo MSP, se recomienda analizar los parámetros adimensionales de peralte de onda $\varepsilon = H/L$, y la altura relativa de la onda $\delta = H/h$ que definen la no linealidad del flujo, la profundidad relativa $\mu = h/L$ ó $\mu = kh$ que define la dispersividad de las ondas, y el número de Ursell $Ur = \delta/(kh)^2$ que clasifica los diferentes tipos de movimiento del flujo.

De manera análoga a lo planteado con el modelo MSP, se deben de considerar los efectos dispersivos del flujo cuando $h/L > 1/8$ ó $kh > 0.78$.

Con un número de Ursell $Ur \ll 1$ se tienen situaciones en donde la no linealidad es despreciable y la teoría lineal de Stokes es la que rige. Para un número de Ursell $Ur \gg 1$, se tiene un régimen no lineal de ondas.

El conocer los parámetros que clasifican el elemento forzador a utilizar, permite optimizar los recursos del modelo, lo cual se traduce en menos tiempo de computación y mayor estabilidad numérica.

Si se desea realizar simulaciones utilizando elementos forzadores reales medidos en laboratorio o campo, se recomienda realizar un tratamiento previo de datos, que permita adaptar las características de las series temporales de superficie libre a la zona numérica de generación. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Se recomienda seleccionar una serie temporal corta de aproximadamente 30 minutos a 1 hora, en la cual se encuentren definidos los forzamientos de interés especial en el estudio. Sin embargo, se sabe que en la actualidad, las series utilizadas en las simulaciones, generalmente no superan los 15 minutos de duración, debido en parte al excesivo tiempo computacional que el modelo numérico puede implicar.

La selección de la duración de las series temporales a utilizar en las simulaciones numéricas, está íntimamente ligada a la calidad y alcances de los resultados que se desean obtener. Por esto, se debe de realizar un análisis espectral previo de las series seleccionadas para diferentes intervalos temporales, para que de esta forma, el técnico pueda ponderar la calidad de resultados que desea obtener para diferentes tiempos de simulación.

- Se recomienda conservar la frecuencia de medición original utilizada en laboratorio o en campo en las series temporales de superficie libre seleccionadas, y no aplicar ningún tratamiento que interpole las series, a menos que ésta presente discontinuidades importantes.
- En el caso de realizar simulaciones con oleaje espectral, se deben de establecer los parámetros para construir un espectro teórico tipo JONSWAP direccional. El modelo transformará la energía total del espectro y generará una serie temporal sintética, con amplitudes, periodos y fases aleatorias tomadas directamente del espectro JONSWAP.
- En el caso de que se busque simular un espectro de onda corta con su correspondiente paquete energético de onda larga asociado (siguiendo la metodología propuesta anteriormente), se sigue el mismo procedimiento del punto

anterior, y adicionalmente se suma la frecuencia y energía de onda larga al total de series de amplitudes, periodos y fases aleatorias del espectro JONSWAP original.

- En el caso de requerir simulaciones temporales de más de 12 horas, se debe de filtrar la marea astronómica, y se deben de evaluar las posibles repercusiones que éste filtrado supone en los resultados finales, por ejemplo con el modelo MSP.
- Si el registro temporal de superficie libre medido en campo, incluye altas frecuencias ($f > 4$ s), que puedan comprometer el tamaño mínimo del elemento numérico dentro del dominio, es recomendable que éstas se eliminen del registro original, para así evitar tamaños de malla excesivos.
- Se debe de descomponer la serie temporal de superficie libre seleccionada (previamente filtrada la marea y las altas frecuencias mencionadas anteriormente), en series de amplitudes, frecuencias angulares y fases, directamente obtenidas al aplicar una transformada de Fourier a la serie seleccionada.
- La serie de amplitudes, frecuencias y fases obtenida en el punto anterior, servirán para alimentar el modelo numérico.

c) Recomendaciones acerca de la elección de los mecanismos de disipación de energía

Cuando se trabaje con ondas cortas sobre fondos someros, se recomienda activar el mecanismo de disipación de energía por rotura, particularmente si la zona de estudio presenta cotas batimétricas correspondientes a playas o bajos de importante consideración. Siempre que se decida activar el mecanismo de disipación de energía por rotura, se recomienda activar el mecanismo que evalúa la mezcla turbulenta asociada a la rotura.

En el trabajo de calibración del modelo numérico MANOLO con datos reales de laboratorio o campo, se utiliza generalmente el mecanismo de disipación de energía por fricción en el fondo. Para este trabajo se recomienda proponer los coeficientes de

fricción relacionados directamente con el material de fondo que se tenga en la zona de interés, a través de los coeficientes C_e de Chezy, la f_w de Darcy, o la n_m de Manning.

Los valores que comúnmente se presentan en las zonas portuarias son los siguientes:

$f_w = 0.003$ a 0.01 para fondos arenosos

$f_w = 0.01$ a 0.2 para fondos rocosos

d) Recomendaciones sobre los tiempos de simulación, incrementos de tiempo, y estabilidad numérica

La duración de la simulación numérica debe de coincidir con la duración del estado de mar seleccionado para cada caso de estudio.

Para seleccionar el incremento de tiempo numérico en las simulaciones, se recomienda verificar por un lado el establecido por Courant que únicamente obedece a un término de estabilidad numérica del flujo que se propaga en una malla numérica.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\sqrt{gh}} \quad (I.21)$$

donde

Δt - Incremento de tiempo mínimo

Δx - Longitud mínima del elemento en toda la malla numérica

g - Constante de aceleración en m/s^2

h - Profundidad para el elemento mínimo en el dominio en m

Por otro lado, si atendemos la adecuada representación física de las ondas que se desean propagar en el dominio se recomienda, que el incremento de tiempo cumpla con al menos el valor de:

$$\Delta t = \frac{T}{200} \quad (I.22)$$

Para las simulaciones se debe de elegir el incremento de tiempo menor de los obtenidos anteriormente.

La duración mínima de las ejecuciones debe de permitir que los trenes de ondas que se propaguen lleguen a la zona de estudio. Esto se verifica obteniendo la celeridad de fase de las ondas incidentes.

Finalmente, para asegurar la estabilidad numérica durante toda la ejecución, se recomienda que durante la ejecución de las simulaciones se verifique continuamente el número de iteraciones que se va presentando en cada paso (resultado de las iteraciones en el paso predictor – corrector en el esquema temporal de solución), y en el caso de observar iteraciones superiores a 8, se recomienda bajar el incremento de tiempo numérico Δt mínimo propuesto inicialmente.

e) Recomendaciones acerca de los factores de escala a considerar

En ocasiones es necesario aplicar un escalado a las condiciones a simular en el modelo numérico MANOLO, de forma análoga a lo que ocurre cuando se diseñan trabajos en modelo físico en laboratorio, y se trasladan las dimensiones del prototipo a dimensiones semejantes en modelo.

Las modelaciones hidráulicas que se realizan con el modelo MANOLO, están diseñadas para operar bajo la escala de Froude, y las relaciones de escala de las dimensiones características para modelos sin distorsión vertical deben de seguir las mostradas en la tabla I.6, tomando una escala ilustrativa de 1:100.

Característica	Dimensión	Relaciones de escala
Longitud	L	$L_r = 1 : 100$
Área	L^2	$A_r = L_r^2 = 1 : 10,000$
Volumen	L^3	$\forall_r = L_r^3 = 1 : 1,000,000$
Tiempo	T	$T_r = L_r^{1/2} = 1 : 10$
Velocidad	L/T	$V_r = L_r^{1/2} = 1 : 10$
Rugosidad (coeficiente n de Manning)	$L^{1/6}$	$n_r = L_r^{1/6} = 1 : 2,154$
Descarga	L^3/T	$Q_r = L_r^{5/2} = 1 : 100,000$
Fuerza (agua dulce)	F	$F_r = L_r^3 \gamma_r = 1 : 1,000,000$
Fuerza (agua salada)	F	$F_r = L_r^3 \gamma_r = 1 : 1,025,641$

*Tabla I.6 Valores típicos de escala para modelación física en puertos,
Coastal Engineering Manual (2003) Vol. 5.*

La selección de un factor de escala adecuado es determinante en el diseño de las simulaciones numéricas cuando las dimensiones del prototipo excedan las limitaciones numéricas del modelo.

La literatura recomienda las escalas de 1:75 y 1:150 para estudios numéricos de agitación portuaria relacionados con las ondas cortas, y de 1:100 y 1:400 para los estudios con ondas largas (periodos mayores a 25 s).

Los modelos numéricos a pequeña escala, deben de construirse con detalle para reproducir adecuadamente las condiciones del prototipo. El modelo debe de reproducir fielmente los contornos batimétricos para modelar las transformaciones de las ondas, las líneas de costas e irregularidades.

Se recomienda también que el lecho batimétrico del modelo se suavice lo máximo posible, para minimizar los efectos viscosos de escala.

f) Comentarios sobre las limitaciones del modelo numérico MANOLO

A continuación se exponen algunas de las limitantes que el modelo numérico MANOLO presenta para la realización de estudios de agitación y resonancia portuaria.

En primer lugar se debe de considerar que el modelo numérico MANOLO se debe de aplicar para el rango de $0 < h/L < 0.5$, dentro del que las ecuaciones son válidas.

El esquema espacial de solución que presenta el modelo MANOLO, no es capaz de simular los efectos de marea astronómica.

Es bien sabido que los modelos de Boussinesq, en general, tienen una exigencia computacional y tiempos de simulación elevados. Sin embargo, el modelo MANOLO se mantiene como uno de los más rápidos de los existentes actualmente.

I.5 TRATAMIENTO DE RESULTADOS

En este último apartado se presenta un resumen del tipo de resultados que se pueden obtener a partir de la metodología integral para realizar estudios de agitación y resonancia portuaria.

La metodología integral, a través del modelo MANOLO puede generar series temporales de superficie libre, velocidad en el plano bidimensional U - V , y presión, estos últimos dos parámetros en el fondo, a la profundidad $\alpha = 0.58h$ (ver Nwogu (1993)), y en la superficie libre.

Si a dichas series temporales de datos numéricos, se les aplica una metodología de análisis adecuada, pueden llegar a aportar una base sólida para cualquier estudio de ingeniería portuaria, diseño o mejora de puertos reales, considerando en todo momento los procesos no lineales, dispersivos, acoplados y transitorios que presentan las oscilaciones dentro de las dársenas portuarias.

Con las series temporales obtenidas con el modelo MANOLO, se pueden llevar a cabo análisis para estados de mar desde poco a muy energético en cualquier zona del dominio y para diferentes configuraciones portuarias.

Las series temporales de superficie libre que ofrece el modelo MANOLO, permiten además realizar análisis a corto (dominio de tiempo, dominio de la frecuencia, y dominio de la probabilidad) y a largo plazo (regímenes medios y extremales).

Dentro del análisis a corto plazo en el dominio del tiempo, se puede llevar a cabo la identificación del número de olas, la altura de cada olas individual y periodo, la obtención de funciones de distribución para cada estado de mar, y la determinación de las funciones de auto-correlación, y funciones de distribución conjunta H - T .

Para el dominio de la frecuencia se pueden obtener los espectros de oleaje para cada estado de mar, los parámetros espectrales H_s , T_p , T_z , H_{max} , la energía de onda larga vinculada al espectro de onda corta, el espectro direccional, los espectros cruzados y la

identificación de la transferencia temporal de los paquetes de energía de onda corta hacia onda larga a través de la técnica *wavelet*.

En cuanto a los estudios a corto plazo en el dominio de la probabilidad, se pueden obtener las funciones de probabilidad $P(H)$, $P(T)$ y $P(H, T)$, para cada estado de mar, y de esta forma acceder a las predicciones de la altura de ola media y significativa, alturas de ola máxima, periodo medio, periodo de pico, periodo significativo, frecuencia de ocurrencia de la rotura y la frecuencia de ocurrencia de los grupos de ondas cortas.

Dentro del análisis a largo plazo, se pueden obtener los regímenes medios y extremales (escalares y direccionales), en cualquier punto dentro de las instalaciones portuarias, a través de la obtención de una función que traslade los regímenes medios y escalares desde aguas profundas (obtenidos directamente de las bases de datos instrumentales, escalares y direccionales (por ejemplo, HIPOCAS)), al punto objetivo dentro de las dársenas del puerto.

La función de transferencia mencionada anteriormente se obtiene con los parámetros (H_s , T_p , nivel de marea y θ), de cada estado de mar simulado utilizando el modelo MANOLO, seleccionando estados de mar con distintas características energéticas.

Debido a que los datos en bruto obtenidos mediante los modelos numéricos, en ocasiones no presentan la estructura más adecuada para una aplicación directa en cada estudio portuario particular, es necesario exponer algunas recomendaciones generales y mencionar cuáles son los datos que comúnmente se requieren para cada estudio particular.

Este apartado intenta presentar una relación de los datos de salida que la metodología integral para estudios de agitación y resonancia portuaria proporciona, con algunos de los estudios más comunes dentro del ámbito de la ingeniería portuaria, describiendo brevemente el tipo de datos que requiere cada uno de ellos para cumplir los objetivos de diseño, operatividad, mantenimiento, mejora, etc., siguiendo el esquema propuesto en la tabla I.4.

a) Estudios de agitación para puertos comerciales, pesqueros y deportivos

Para estudios de agitación, diseño y ampliación de instalaciones portuarias existentes, se utilizan generalmente los regímenes medio y extremal obtenidos con los modelos OLUCA y MSP, en relación con los datos históricos de altura de ola significativa, periodo de pico y direcciones de la base de datos HIPOCAS.

Estos datos, pueden llegar a determinar las amplitudes, frecuencias y sollicitaciones de operación de puertos deportivos, pesqueros, y comerciales.

Para el diseño en planta de las instalaciones portuarias, los mapas bidimensionales x - y de superficie libre son de gran utilidad, en particular los mapas bidimensionales que presentan los datos de altura de ola promediada en fase, tomando ventanas temporales representativas del estado de mar.

Para evaluar la operatividad de los puertos, definida ésta como el porcentaje de tiempo anual en que el puerto cumple con sus funciones de diseño (navegabilidad, pernocta, transito de mercancías, etc.), de manera segura, se debe de contar con datos sobre variaciones del nivel del mar debido a la marea astronómica, y oleaje, que condicionen dicha operatividad, estos datos se pueden obtener directamente de los regímenes obtenidos en cada zona de interés dentro y fuera del puerto.

Los regímenes medios y extremales sirven para calcular el tiempo en que el puerto permanece operativo, y con estos datos se obtienen los parámetros estadísticos de regímenes de operación de parada operativa y de persistencia en la operatividad, definidos con más a detalle en la ROM 0.0.

Los requisitos de proyecto en cuanto a seguridad, servicio y explotación portuaria, deben de considerar la probabilidad conjunta de fallo, y la probabilidad conjunta sin paradas operativas, evaluando la fiabilidad, funcionalidad y operatividad con la obtención de los máximos valores recomendados para la vida útil de los puertos.

Por esto, es muy importante que los datos obtenidos numéricamente a través de la metodología expuesta, contengan información de altura de ola, periodo y dirección para diversos niveles de marea en todo el dominio de estudio.

b) Estudios de resonancia en puertos

Para realizar estudios de resonancia en puertos, se requiere conocer los patrones de oscilación dentro de las dársenas a través de los mapas bidimensionales en planta que el modelo numérico MANOLO ofrece, identificar las frecuencias y modos naturales de oscilación a través del modelo MSP que se obtienen con el barrido de frecuencias, y obtener las amplificaciones resonantes reales dentro de las dársenas, teniendo en cuenta los distintos mecanismos de disipación involucrados en el sistema y la temporalidad del fenómeno.

Para evaluar los efectos no lineales que presenten las oscilaciones resonantes, bajo la acción de series temporales de superficie libre para oleaje de onda corta y onda larga (espectro JONSWAP y energía de onda larga), se deben de verificar las series de superficie libre en diferentes puntos dentro y fuera de las dársenas y con éstas, obtener los diferentes espectros de energía que nos darán información sobre las transferencias energéticas que ocurren entre frecuencias en los distintos puntos del dominio.

Conocer los espectros de energía en distintos puntos del dominio, permite conocer el comportamiento energético de las oscilaciones resonantes, para distintas configuraciones portuarias y estados de mar incidentes.

Para verificar los efectos transitorios dentro de las transferencias de energía durante los eventos resonantes, se deben de obtener los espectros wavelet para los distintos puntos dentro del dominio.

Si se desea conocer los factores de amplificación resonante dentro de las dársenas portuarias con los datos obtenidos mediante el modelo MANOLO, se debe de evaluar un espectro de energía en una zona exterior al puerto $S_{exterior}$ que se considere no estar afectado de la radiación del puerto, y el espectro en un punto dentro de cada dársena

$S_{interior}$ (puntos en las esquinas preferentemente). El factor de amplificación se obtiene como la raíz cuadrada de la división del espectro interno de las dársenas por el espectro exterior, como sigue.

$$K_{Amp} = \sqrt{\frac{S_{Interior}}{S_{Exterior}}} \quad (I.17)$$

El coeficiente de amplificación K_{Amp} , debe de representarse con respecto al eje de frecuencias y/o periodos obtenidos del análisis espectral.

c) Estudios de dinámica sedimentaria

En cuanto al análisis a corto plazo para evaluar el movimiento de sedimentos en la zona portuaria por acción del oleaje, se necesita contar con datos de oleaje espectral en la zona de interés, para posteriormente acoplar dicha información, con un modelo empírico de transporte de sedimentos que resuelva la ecuación de flujo de sedimentos.

Los regímenes medios y extremos obtenidos con los modelos OLUCA y MSP son de gran utilidad para estimar las tasas de movimientos de transporte litoral, incluso a escala de largo plazo (a partir de series de datos HIPOCAS).

De igual forma, para llevar a cabo estudios sobre los efectos del dragado en dársenas y canales de navegación, en general se requiere trabajar con los datos de superficie libre, direcciones, y corrientes promediadas en fase, antes y después de la realización de los trabajos de dragado, para diferentes instantes de marea. Estos datos los puede ofrecer tanto el modelo MANOLO, como el modelo MSP.

Los estudios de dragado en puertos y canales de navegación, generalmente comparan las alturas de ola significativa, las diferencias en los ángulos de propagación del oleaje dentro de las dársenas y las diferencias en la magnitud de las corrientes dentro y fuera de la zona portuaria, comparando el estado inicial con diferentes estados de dragado.

d) Estudios de diseño de estructuras en puertos

Para estudios relacionados con el diseño de estructuras portuarias reflejantes (diques verticales, diques mixtos, y espaldones), se recomienda utilizar los resultados temporales de superficie libre y presión en el fondo frente a la cara expuesta de la estructura para los diferentes estados de mar seleccionados obtenidos con el modelo MANOLO.

Con esta información, se estiman los parámetros de altura de ola máxima H_{max} , altura de ola significativa H_s , periodo de pico T_p , y periodo medio T_m , para posteriormente obtener las cargas exteriores (hidrostática y dinámica debida al oleaje), a fin de poder evaluar los modos de fallo más comunes de este tipo de estructuras monolíticas (deslizamiento, vuelco, asientos diferenciales, fallo generalizado del lecho marino, y erosión de la banqueta de apoyo).

La literatura ofrece un gran número de técnicas para determinar las fuerzas y presiones sobre estructuras portuarias reflejantes. Se recomienda revisar el trabajo de Martin *et al.* (1994), donde expone un resumen del estado del arte sobre la interacción de ondas de gravedad con estructuras reflejantes.

I.6 EJEMPLO DE APLICACIÓN, ESTUDIO DE RESONANCIA EN EL PUERTO DE LASTRES

El objetivo de este último apartado es ilustrar de una manera gráfica los pasos ordenados que se deben de seguir para realizar un estudio básico de resonancia portuaria en instalaciones reales.

Esta sección no pretende ahondar en los procesos físicos que sufre el flujo dentro de las dársenas durante los eventos resonantes y tampoco se encarga de analizar el clima marítimo en la zona de estudio ni las condiciones morfodinámicas. Simplemente se trata de un ejercicio que ofrece de una manera práctica la aplicación directa de la metodología numérica expuesta en apartados anteriores, con el objetivo fundamental de obtener los forzamientos adecuados para evaluar los modos de resonancia naturales de las dársenas, los factores de amplificación reales, y los paquetes de energía de onda larga vinculada a grupos de onda corta y su relación con los episodios de resonancia portuaria, teniendo en cuenta los efectos no lineales, dispersivos, bidimensionales y disipativos que ocurren en la zona de estudio a lo largo del tiempo.

I.6.1 Determinación de los modos naturales de oscilación, aproximación lineal

Los detalles sobre la localización y características morfológicas del puerto de Lastres, se puede ver a detalle en Díaz (2002).

El primer paso dentro de la metodología numérica es evaluar los modos resonantes de oscilación de las dársenas del puerto de Lastres.

La figura I.1 muestra las dos dársenas que componen el puerto de Lastres, con sus contornos geométricos y dimensiones aproximadas. El análisis se realiza para ambas dársenas portuarias, y la determinación de los modos naturales de oscilación se realizará mediante una aproximación analítica y un barrido de frecuencias utilizando el modelo MSP.

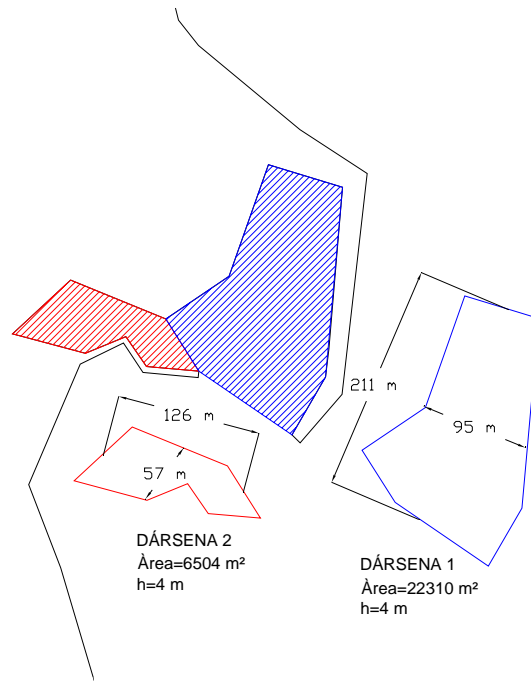


Figura I.1 Localización de las dársenas de estudio y dimensiones aproximadas del puerto de Lastres.

El primer paso a seguir es utilizar la aproximación analítica expuesta en apartados anteriores (ecuación I.18). Se pueden encontrar los siguientes valores de los modo fundamental de oscilación para las dos dársenas del puerto de Lastres, para los valores de batimetría en bajamar.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g \cdot 4 \cdot 95}{22310 \cdot 211}} = 4.47 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g \cdot 4 \cdot 57}{6504 \cdot 126}} = 8.83 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Por lo tanto los valores de los modos naturales de oscilación aproximados para ambas dársenas son, $T_1 \approx 223 \text{ s}$, y $T_2 \approx 120 \text{ s}$.

El paso siguiente es diseñar la malla en elementos finitos, sobre una batimetría real y siguiendo los contornos reales de la línea de costa y el puerto. Las dimensiones, disposición de sensores, batimetría y malla en elementos finitos utilizada en el modelo MSP se muestran en la figura I.2.

En general, las dimensiones numéricas de la zona de estudio fueron diseñadas en función de los sensores de medición, batimetría obtenida y estudios previos realizados durante la campaña de campo realizada por el GIOC y CEDEX durante la segunda mitad del año 2001.

Para este ejemplo, las dimensiones del dominio y malla en elementos finitos del puerto de Lastres diseñada para el modelo MSP, corresponde a las dimensiones mínimas recomendadas en la metodología (0.5 veces la longitud de onda representativa para estudios de onda larga).

Se asigna como longitud de onda representativa el valor de $L=4000$ m (correspondiente a un periodo representativo de $T=320$ s sobre una profundidad de $h=16$ m), de esta forma se asegura que la longitud máxima de onda larga de análisis ($L=2880$ m, para $T_l \approx 223$ s y $h=16$ m), quede contenida al menos 0.5 veces dentro del dominio. Finalmente, la longitud principal del dominio es igual a $0.5 \times 4000 = 2000$ m.

Se toma la profundidad de $h=16$ m debido a que corresponde al calado medio existente en el extremo Norte del dominio propuesto.

Cabe mencionar que se han realizado tres mallas diferentes, para tres niveles de marea distintos, pleamar $m=2.3$ m, media marea $m=0$ m y bajamar $m=-2.1$ m, siguiendo las recomendaciones de la metodología expuesta anteriormente. La figura I.2 únicamente representa la malla en el nivel de media marea.

Las tres mallas finales en elementos finitos se diseñan con al menos 15 nodos por longitud de onda para un periodo de $T=30$ s, ya que éste será el valor mínimo de partida del barrido de frecuencias. La malla diseñada para el nivel medio de marea cuenta con 10551 nodos y 20409 elementos, para el nivel de marea de bajamar con 26946 nodos y 52651 elementos y la correspondiente al nivel de marea de pleamar con 7453 nodos y 14494 elementos. Tanto la corona norte como los contornos Sur y Este son contornos 100% absorbentes, y el resto de contornos 100% reflejantes.

El diseño de la malla y los elementos numéricos generados, siguen los contornos batimétricos y concentran nodos y elementos en función del calado en cada zona particular del dominio, esto se puede ver en la figura I.2

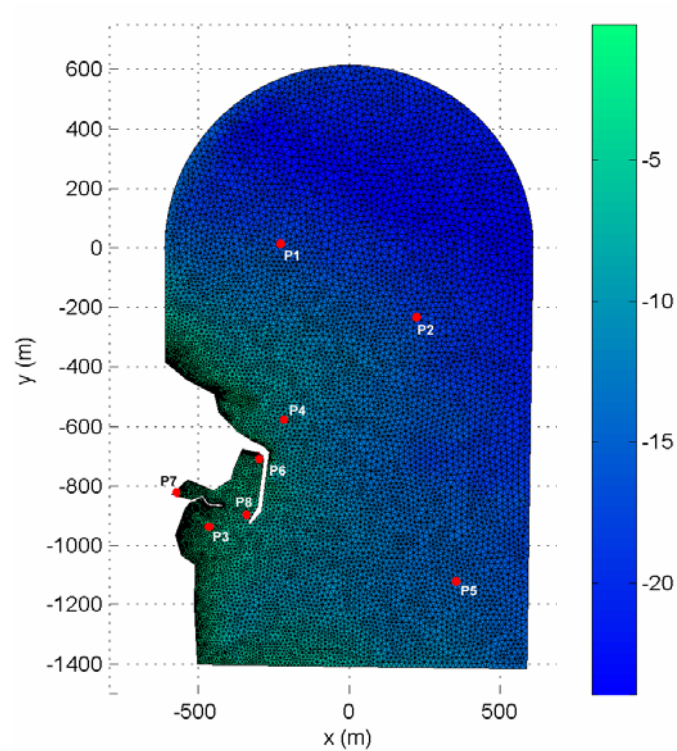


Figura I.2 Malla en elementos finitos, batimetría y sensores empleados en la simulación MSP para el nivel de marea media.

El siguiente paso es aplicar a la zona de estudio un forzamiento tipo ruido blanco (barrido de periodos), para obtener las respuesta resonantes para los puntos interiores en las dos dársenas (puntos 6 y 7), los resultados obtenidos para la respuesta de oscilación resonante para el puerto de Lastres, para las dársenas 1 y 2 y para los tres instantes de marea seleccionados, se muestran en la figura I.3.

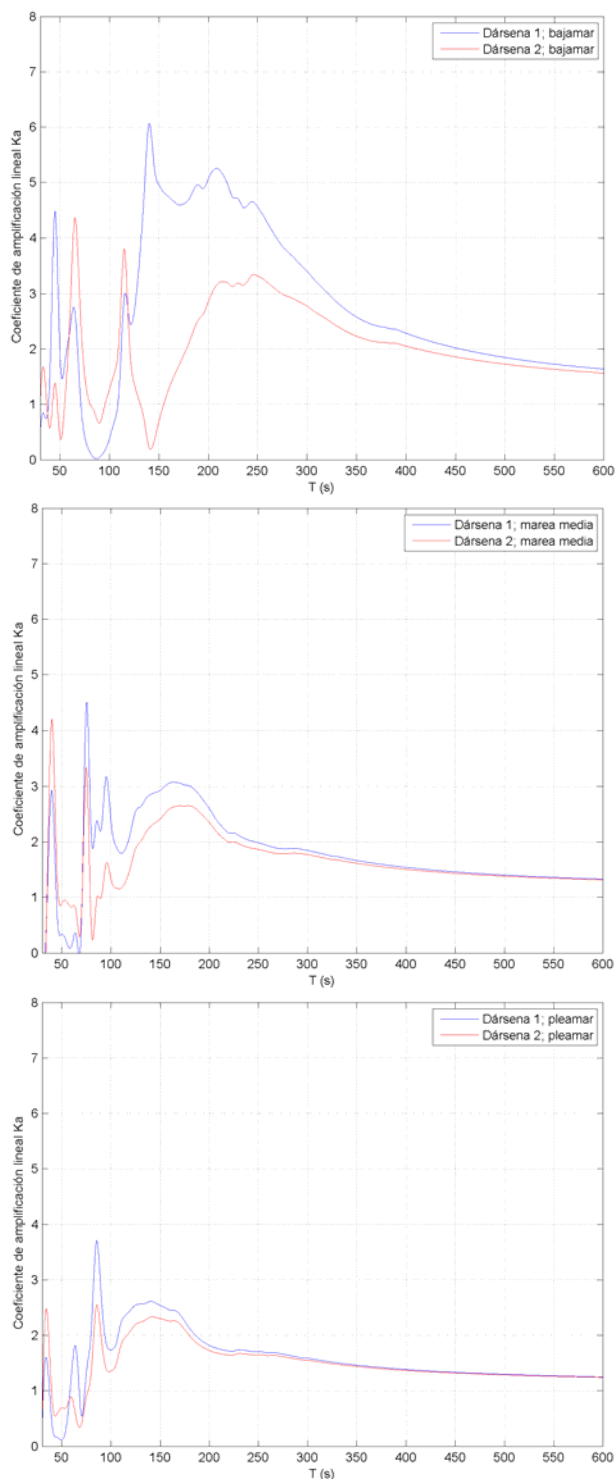


Figura I.3 Coeficientes de amplificación para las dársenas 1 y 2 del puerto de Lastres, para los niveles de marea bajamar, media marea y pleamar.

El barrido de frecuencias se realizó dentro del siguiente rango de periodos $30s < T < 600s$, cada 1 segundo.

En la figura I.3, se puede observar la fuerte influencia que tiene el nivel de marea para la determinación de los periodos de resonancia dentro de las dársenas del puerto de Lastres. Se observa que los efectos más energéticos se manifiestan durante el nivel de marea de bajamar, mientras que los picos resonantes se trasladan hacia periodos menores conforme el nivel de marea aumenta, y los coeficientes de amplificación tienden a disminuir.

Debido a lo mencionado anteriormente, en este ejemplo se realizará únicamente el análisis de resonancia para el caso de bajamar, que se presenta a continuación.

Para el caso de bajamar, la figura I.3 muestra los coeficientes de amplificación obtenidos con el modelo MSP para las dársenas 1 y 2 del puerto de Lastres. Se tiene que los periodos de oscilación para la dársena 1 son para los 3 primeros modos: $T_{1,1}=215\text{s}$, $T_{1,2}=140$, $T_{1,3}=52\text{s}$, y para la dársena 2: $T_{2,1}=250\text{s}$, $T_{2,2}=120\text{s}$; $T_{2,3}=65\text{s}$.

Los valores obtenidos para los modos fundamentales de oscilación de forma analítica, se aproximan a los valores obtenidos numéricamente en la primera parte de este ejemplo de aplicación para el primer modo de oscilación de la dársena 1 y el segundo modo de oscilación de la dársena 2.

Si se toman los valores de cada periodo de oscilación resonante para cada dársena, se pueden encontrar los patrones de oscilación de superficie libre en el plano bidimensional x - y utilizando el modelo MSP alimentado con una onda monocromática de altura de ola $H=1\text{m}$ y tomando los periodos directamente de los periodos resonantes obtenidos anteriormente. La figura I.4 muestra los resultados de dicho análisis.

Para obtener los patrones de oscilación bidimensionales para cada periodo de resonancia obtenido, se utiliza la misma malla diseñada para el nivel de bajamar y se conservan los contornos 100% reflejantes.

En la figura I.4 se puede observar que para los primeros modos de oscilación de $T=215$ s y $T=250$ s para las dársenas 1 y 2 respectivamente, los patrones de oscilación presentan un antitodo localizado en el contorno exterior Norte del puerto de Lastres, y

prácticamente toda el área protegida del puerto se ve afectada por una zona de antinodo que se extiende hacia la bocana y la playa adyacente.

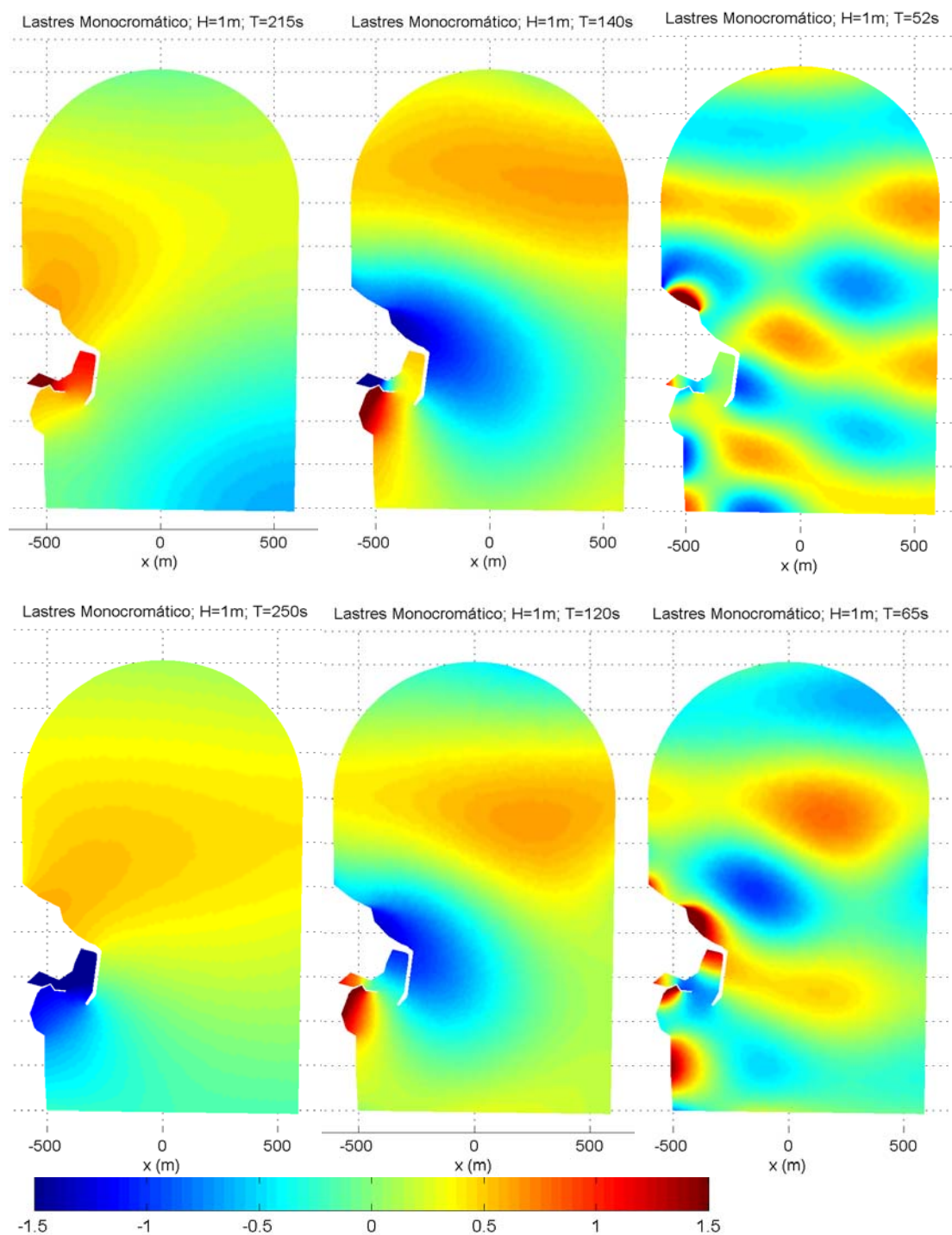


Figura I.4 Patrones de oscilación para los seis diferentes periodos resonantes para las dársenas 1 y 2 del puerto de Lastres.

Para el segundo modo de oscilación $T=140$ s y $T=120$ s de la primera y segunda dársena respectivamente, la figura I.4 muestra un antinodo en la zona exterior Norte del Puerto, que cubre prácticamente todo el dique principal del puerto hasta el morro del mismo. Esto hace que se genere una línea nodal que sigue la línea imaginaria definida entre la dársena 1 y 2, situación que promueve un desfase oscilatorio entre ambas dársenas, y entre la zona Este del dique principal y la playa adyacente.

Finalmente, si observamos los patrones de oscilación para el tercer modo de oscilación de ambas dársenas $T=52$ s y $T=65$ s, se puede ver que el sistema oscilatorio exterior del puerto tiende a presentar un patrón de crestas cortas con áreas de nodos y antinodos intercaladas, mientras que dentro de las dársenas se observa un sistema oscilatorio en fase entre ambas dársenas, mostrando tres antinodos y dos nodos localizados en la línea media transversal de las dársenas.

I.6.2 Determinación de los elementos forzadores

Ya habiendo identificado, los periodos de oscilación del sistema portuario para el caso de bajamar, se aplica a continuación la metodología para obtener las series sintéticas de oleaje irregular a ser aplicadas en el modelo MANOLO.

A partir de cada periodo natural resonante obtenido para cada dársena, se obtienen los pares de valores que caracterizan la onda larga H_L^* y T_L^* vinculada a las oscilaciones de onda corta.

Para obtener el valor del periodo de pico de onda corta, se acude a la relación empírica mostrada en la tabla I.2 para el caso de Lastres que relaciona el periodo de pico de onda larga con el periodo de pico de onda corta para la zona de Lastres, como sigue:

$$T_p = \frac{T_p^*}{8.03}$$

Se toman los seis periodos de resonancia obtenidos anteriormente y se aplica directamente la relación anterior, obteniendo los valores del periodo de pico de onda corta siguientes:

	T_{L1}^*	T_{L2}^*	T_{L3}^*	T_{p1}	T_{p2}	T_{p3}
<i>Dársena 1</i>	215	140	52	26.77	17.43	6.47
<i>Dársena 2</i>	250	120	65	31.13	14.94	8.09

Debido a que la relación entre periodos de onda larga y corta no depende de la altura de ola significativa de onda corta (demostrado para el caso de Lastres únicamente), se decide utilizar la relación que presenta la ROM 0.3-91 para los registros instrumentales entre altura de ola y periodo en temporales en la boya de Gijón, mostrado en la figura I.5.

GIJON	0.010 ~ 0.05	≈ 1.22	$T_p = (4 \sim 9.7) \sqrt{H_s}$	5	9 ~ 21,5
				7	10,5 ~ 25,5
				9	12 ~ 29
				11	13 ~ 30
* EN NINGUN CASO SE CONSIDERARAN PERIODOS DE PROYECTO SUPERIORES A 22 SEGUNDOS.					

Figura I.5 Correlación de altura de ola y periodo en temporales para registros instrumentales, tomado de ROM 0.3-91

Se toma la siguiente relación con el factor de 1.7 para asegurar unas alturas de ola significantes con los valores mínimos en los temporales.

$$H_s = \left(\frac{T_p}{9.7} \right)^2$$

Obteniendo los siguientes pares de valores característicos de onda corta H_s y T_p .

	T_{p1}	T_{p2}	T_{p3}	H_{s1}	H_{s2}	H_{s3}
<i>Dársena 1</i>	26.77	17.43	6.47	7.61	3.22	0.444
<i>Dársena 2</i>	31.13	14.94	8.09	10.29	2.37	0.695

Con las combinaciones obtenidas de H_s y T_p para onda corta, se pueden diseñar los espectros JONSWAP a ser utilizados en las simulaciones numéricas con el modelo MANOLO, tomando como profundidad representativa $h=16$ m y $\gamma=3.3$, coincidiendo con la profundidad del sensor 1 situado más al Norte del dominio expuesto en la figura I.2.

El resultado de la generación de los espectros JONSWAP se muestra en la figura I.6.

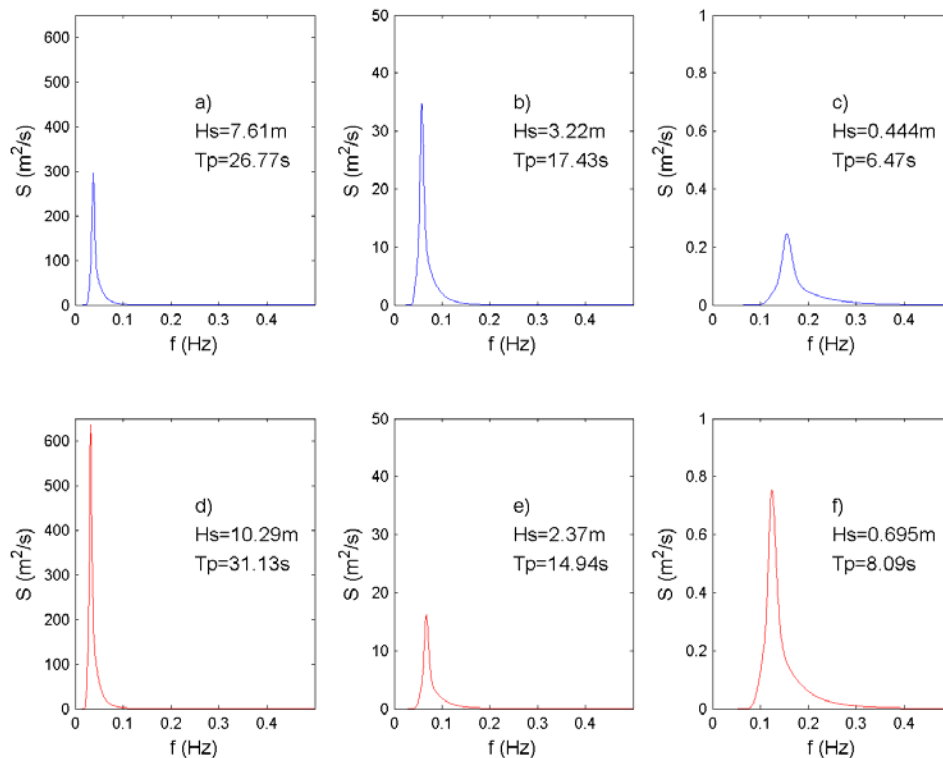


Figura I.6 Espectros JONSWAP diseñados

Se puede observar en la figura I.6, que el primer espectro JONSWAP obtenido para cada dársena (figuras I.6a y I.6d), corresponde a un espectro que supera los 22 segundos de periodo de pico, y según la ROM 0.3-91 no se deben de considerar válidos estos valores espectrales, por lo que se decide desechar estas combinaciones espectrales específicas.

Esto significa que de acuerdo con las mediciones realizadas en campo, se puede descartar la presencia de eventos resonantes que coincidan con las frecuencias

fundamentales de oscilación del cuerpo de agua del puerto de Lastres. Siempre que éstas se generen por efectos de la onda vinculada a grupos de onda corta.

Los eventos resonantes que se puedan manifestar en el puerto de Lastres estarán dentro de los rangos energéticos y frecuenciales definidos por los espectros JONSWAP restantes.

Con los valores de altura de ola significativa y periodo de pico de onda corta restantes, se obtiene la altura de ola significativa de onda larga, utilizando la relación empírica obtenida de la tabla I.2 para la zona de Lastres.

$$H_L^* = 0.007 H_s^{1.36} T_p^{0.81}$$

	H_{s2}	T_{p2}	H_{s3}	T_{p3}	$H_L^* 2$	$H_L^* 3$	T_{p2}^*	T_{p3}^*
<i>Dársena 1</i>	3.22	17.43	0.444	6.47	0.3477	0.0105	140	52
<i>Dársena 2</i>	2.37	14.94	0.695	8.09	0.2022	0.0232	120	65

Los valores encontrados de altura de ola significativa de onda larga a través de la relación empírica, muestran que la altura de ola significativa de onda larga es aproximadamente un 10% de altura de la altura de onda significativa de onda corta.

La relación empírica mostrada anteriormente, fue obtenida con datos de altura significativa de onda corta menores a $H_s < 0.35$ m. Esta situación posiblemente de lugar a valores de altura de onda larga sobre-estimados. Por lo anterior, se decide revisar dichos valores con la energía de onda larga de *set-down* vinculada a grupos de ondas cortas .

Para obtener los valores de la energía de onda larga vinculada a los espectros JONSWAP seleccionados con los que se va a trabajar, se obtiene la energía de onda larga vinculada a los grupos de ondas cortas con las funciones de transferencia de energía representativas de la región en donde se ubica el puerto, con al técnica propuesta en Martín (2003).

En este caso particular la costa del Mar Cantábrico del Principado de Asturias, corresponde a la región 1 y la función de transferencia de energía es igual a:

$$\sqrt{m_0^*} = [J_{m,n}^{-1}] \zeta_{ID}$$

$$[J_{m,n}^{-1}] = 104.60(0.03258\sqrt{h})^{3.2} = 0.154 \text{ para la región 1}$$

Se obtienen los valores de amplitud del *set-down* ζ_{ID} , asociada a los grupos de ondas con los parámetros de cada uno de los cuatro espectros JONSWAP.

Para el primer modo resonante:

	$Hs_2(m)$	$Tp_2(s)$	$C(m/s)$	k	$Cg(m/s)$	$\zeta_{ID} (cm)$	$m_0^*(m^2/s)$
<i>Dársena 1</i>	3.22	17.43	8.68	0.0298	12.699	7.30	1.2638×10^{-4}
<i>Dársena 2</i>	2.37	14.94	7.44	0.0352	10.780	4.13	0.4045×10^{-4}

Para el segundo modo resonante:

	$Hs_2(m)$	$Tp_2(s)$	$C(m/s)$	k	$Cg(m/s)$	$\zeta_{ID} (cm)$	$m_0^*(m^2/s)$
<i>Dársena 1</i>	0.444	6.47	3.22	0.1034	3.724	3.122	0.2311×10^{-4}
<i>Dársena 2</i>	0.695	8.09	4.032	0.0741	5.238	9.78	2.2683×10^{-4}

Finalmente, se tienen los siguientes datos que servirán para configurar los espectros JONSWAP y onda larga a ser utilizados en las simulaciones con el modelo MANOLO. La energía total de onda larga obtenida para cada caso, se presenta en valores de altura de ola equivalente a dicha energía.

Para el primer modo resonante

	$Hs_2(m)$	$Tp_2(s)$	$H_{L2}^*(m)$	$T_{L2}^*(s)$	$m_0^*(m^2/s)$	$H_{eq}(m)$
<i>Dársena 1</i>	3.22	17.43	0.3477	140	1.2638×10^{-4}	0.0317
<i>Dársena 2</i>	2.37	14.94	0.2022	120	0.4045×10^{-4}	0.01798

Para el segundo modo resonante

	$Hs_3(m)$	$Tp_3(s)$	$H_{L3}^*(m)$	$T_{L3}^*(s)$	$m_0^*(m^2/s)$	$H_{eq}(m)$
<i>Dársena 1</i>	0.444	6.47	0.0105	52	0.2311×10^{-4}	0.013597
<i>Dársena 2</i>	0.695	8.09	0.0232	65	2.2683×10^{-4}	0.009254

En las figuras I.7 y I.8 se muestran los espectros JONSWAP que servirán de forzamiento al modelo MANOLO, y la superficie libre generada con cada uno, para el primer modo resonante y el segundo, respectivamente. Han sido diseñados con la profundidad $h=16m$, $\gamma=3.3$, en el rango de frecuencias de $1/600 < f < 0.5$ Hz, y añadiendo la energía de onda larga como un pulso de energía m_0^* en la frecuencia de onda larga establecida.

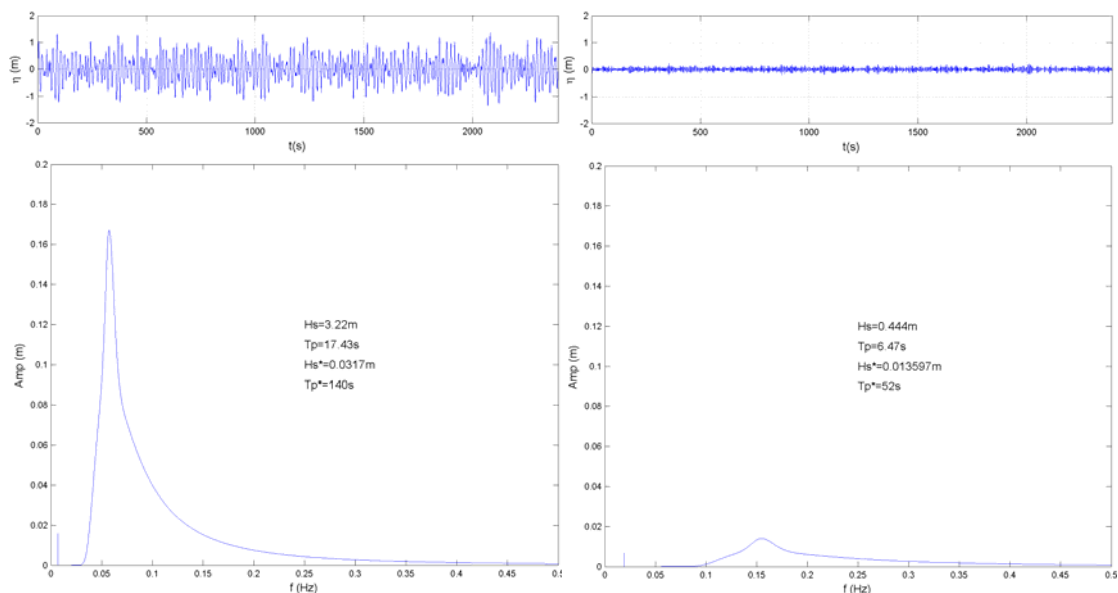


Figura I.7. Espectros de amplitudes JONSWAP + onda larga, para la primera dársena, diseñados para el primer y segundo modo resonante.

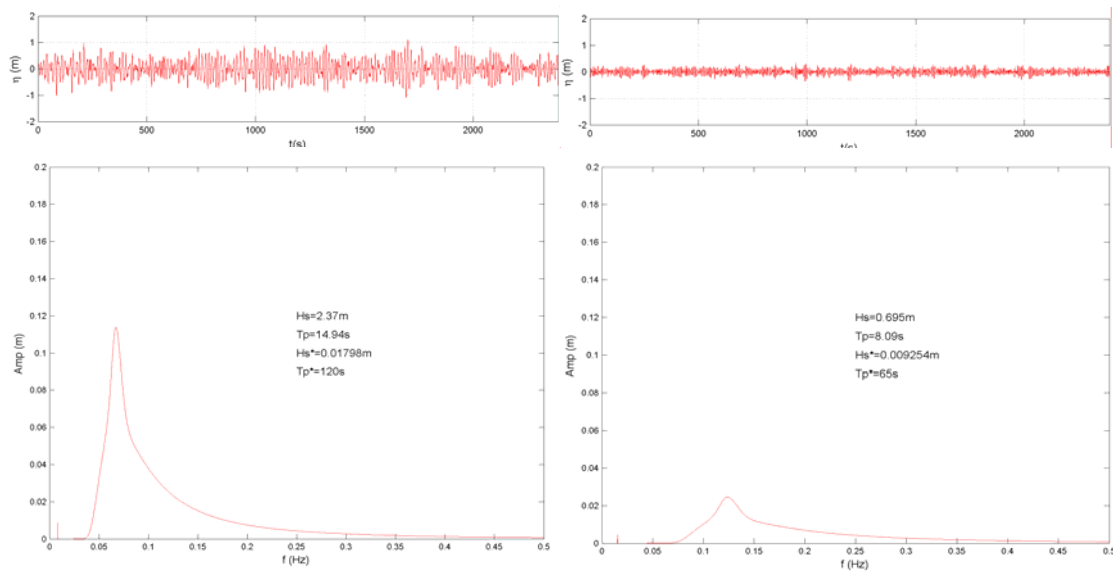


Figura 1.8. Espectros de amplitudes JONSWAP + onda larga, para la segunda dársena, diseñados para el primer y segundo modo resonante.

La reconstrucción de la superficie libre, se realiza a través de la superposición lineal de todas y cada una de las componentes espectrales (amplitudes, y frecuencias), con una función sinusoidal en el tiempo t con fases aleatorias.

1.6.3 Validación del modelo MANOLO con datos de campo

Antes de realizar las simulaciones numéricas utilizando el modelo MANOLO, para estudiar los efectos resonantes dentro de las dársenas, es necesario llevar a cabo un trabajo de calibración y validación del modelo, con base en datos de campo realizados durante la campaña GIOC-CEDEX 2000-2001.

La campaña de campo antes mencionada, se destinó a la toma de registros temporales de superficie libre y corrientes, a través de sensores de presión, correntímetros y boyas, localizados en la zona del puerto de Lastres (4 exteriores y 3 en las dársenas interiores).

En general, se cuenta con un registro continuo de 1 hora para cada sensor, cada 3 horas, es decir 6 registros diarios. Todos los registros medidos en cada sensor durante toda la campaña de campo, han sido homogeneizados y ordenados en una base de datos única,

contando con variables de superficie libre, corrientes y presiones. Este trabajo se puede ver con detalle en Díaz (2002).

Para realizar la validación del modelo MANOLO con datos del puerto de Lastres, se decidió tomar un registro representativo de un estado de mar medio. Para ello, se ha seleccionado de toda la base de datos, una serie temporal en el sensor N1 (punto 1) con una buena correlación espectral (97%), con respecto a un espectro teórico tipo JONSWAP.

Para este trabajo de validación específico, se decidió tomar el registro correspondiente al día 20/02/02 con inicio a las 15:00 horas. Los siete registros medidos en Lastres para la fecha y hora mencionadas en los diferentes sensores, se puede observar en la figura I.9.

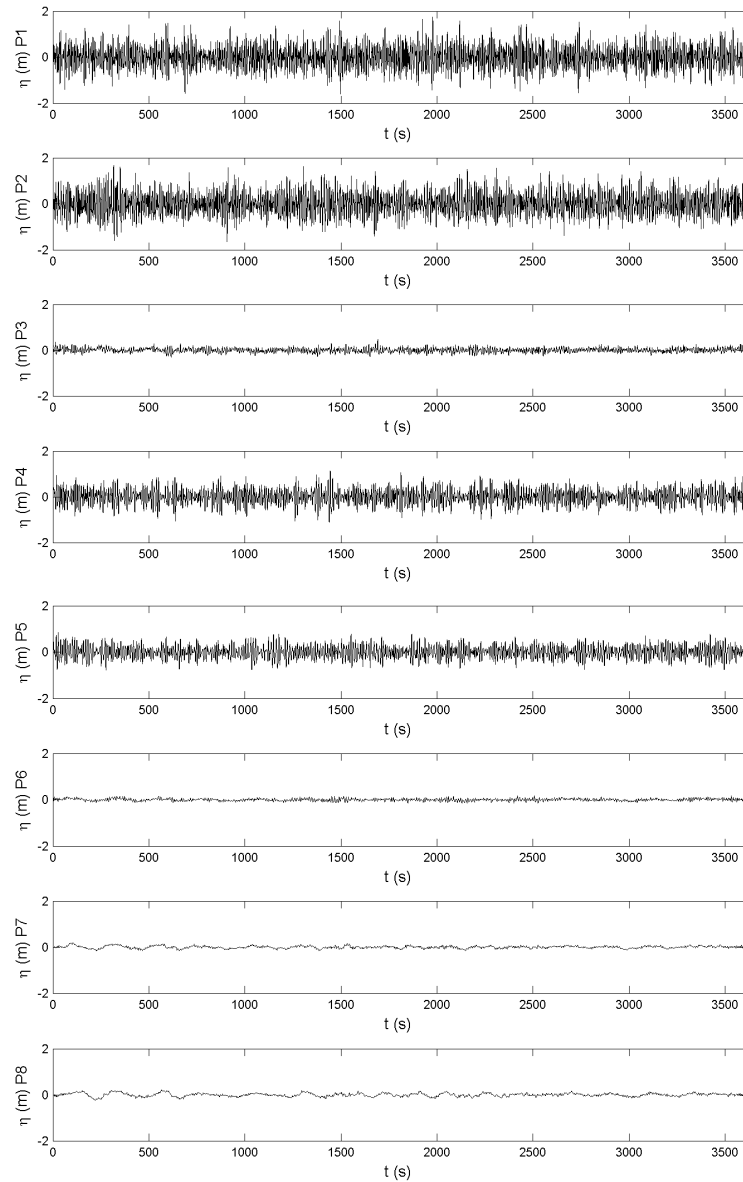


Figura I.9 Registros temporales de superficie libre de la campaña de Lastres, para 20/02/02; 15:00 horas

Los siete registros seleccionados, no requieren ningún trabajo de filtrado de marea debido a que ésta se puede despreciar al contar con únicamente una hora de duración. El nivel de marea registrado en esta fecha y esa hora considerada para el diseño del experimento numérico fue $m=0.31\text{m}$, que corresponde al nivel de marea sobre el nivel medio del puerto para esa fecha y hora.

El diseño del dominio numérico, tal como se ha mencionado en las recomendaciones de este documento, parte del trabajo previo realizado con el modelo MSP, para posteriormente realizar algunas modificaciones en los contornos absorbentes, en la corona de absorción, nivel de marea y en la delimitación del área de generación de oleaje en el interior del dominio.

La zona de generación se coloca exactamente sobre la localización del sensor P1, cuya serie temporal de superficie libre servirá de forzamiento para la simulación dentro de este trabajo de validación. La anchura de la zona se selecciona siguiendo la recomendación de la ecuación (I.15) teniendo en cuenta que la longitud de onda representativa será la correspondiente al periodo de onda máximo del espectro de oleaje incidente en el punto P1.

La longitud de onda representativa del espectro seleccionada para el diseño del área de generación es igual a $L=111$ m ($T=10$ s; $h=16$ m), lo que implica una semi-anchura de generación de $W=27.5$ m, tomando el factor de forma $\delta = 0.5$ recomendado para ondas cortas. En este caso se toma el periodo representativo $T=10$ s, que corresponde al periodo de pico del registro incidente a utilizar.

$$W = 0.5 \left(\frac{111}{2} \right) = 27.5 \text{ m}$$

La longitud del área de generación se determina simplemente extendiendo el área hasta el inicio de la zona de absorción de oleaje colocada en el contorno de Levante.

La línea media longitudinal del área de generación, se hace coincidir con la localización del punto P1, correspondiente al sensor N1 de la campaña de campo, el cual proporciona la serie temporal de superficie libre utilizada en este trabajo de calibración.

La corona de absorción de oleaje, se coloca sobre la antigua corona diseñada para el modelo MSP, y se le asigna una anchura de 580 m, que corresponde a aproximadamente 5 veces la longitud de onda (se recomienda al menos 2.5 veces la longitud de onda representativa), correspondiente al periodo de pico del registro

incidente a utilizar ($T_p=10s$; $h=16m$; $L=111 m$). La corona fue diseñada con 4 nodos por longitud de onda.

Finalmente, se colocan dos zonas de absorción de oleaje en los contornos Este y Sur con el objetivo de absorber todo el oleaje que salga del dominio numérico, ya que dichos contornos representan fronteras abiertas de propagación. La anchura de ambos contornos se determina igual a 250 m (aproximadamente 2 a 3 veces la longitud de onda representativa seleccionada), demostrando un buen funcionamiento a lo largo de las simulaciones.

La figura I.10 muestra el diseño del dominio numérico utilizado en la simulación con el modelo MANOLO, mostrando la zona de generación, los contornos y corona de absorción, y la zona portuaria.

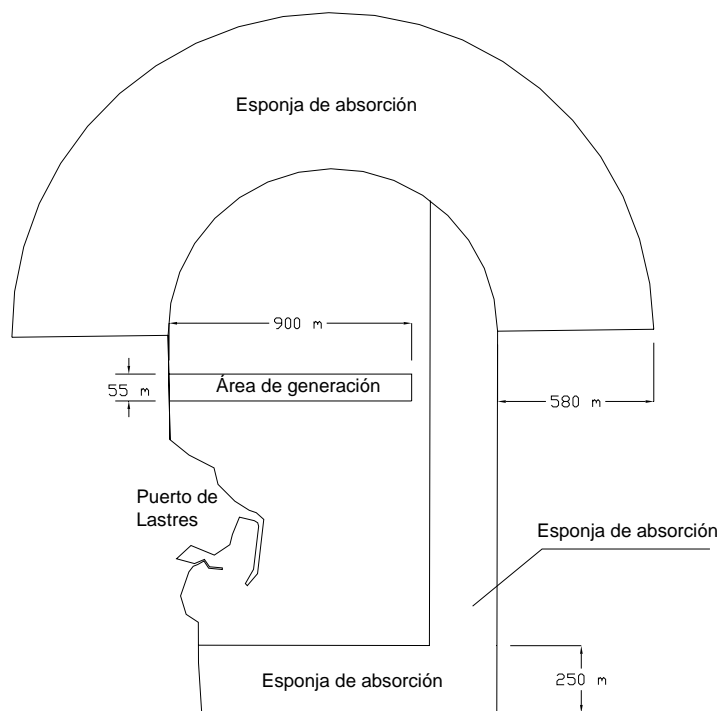


Figura I.10 Diseño del dominio numérico, para las simulaciones del puerto de Lastres con el modelo MANOLO.

Una vez delimitado el dominio numérico y las condiciones de contorno, se genera la malla en elementos finitos triangulares no estructurados, siguiendo los contornos batimétricos reales, y el nivel de marea seleccionado. Se decidió diseñar una malla que

contenga al menos 15 nodos para una longitud de onda correspondiente a un periodo mínimo de 4 s, buscando de esta forma representar todas las frecuencias principales de la serie temporal incidente, y al mismo tiempo no exceder las capacidades computacionales del modelo y limitar los tiempos de simulación elevados.

La malla en elementos finitos diseñada para las simulaciones del puerto de Lastres a través del modelo MANOLO, se muestra en la figura I.11, mostrando además los contornos batimétricos, y la localización de los sensores numéricos utilizados, los cuales coinciden con las correspondientes a las campañas de campo realizadas.

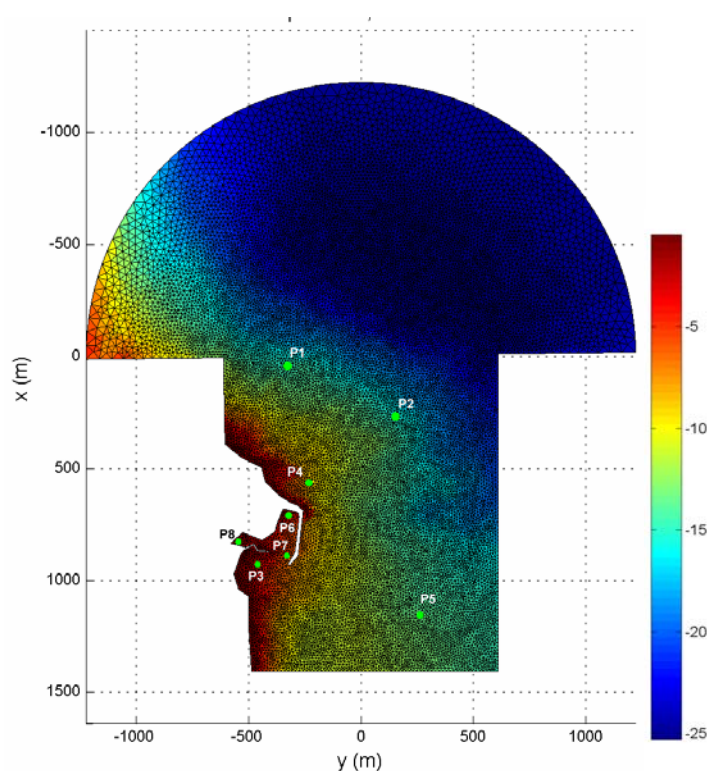


Figura I.11 Localización de Sensores numéricos, batimetría, y malla en elementos finitos triangulares, diseñada para las simulaciones del puerto de Lastres con el modelo MANOLO.

Se puede observar las ventajas de utilizar una malla adaptativa en elementos finitos, debido a que presenta una concentración de elementos y nodos en la zona de interés (zona portuaria), y una optimización de recursos de la malla en la zona de la esponja exterior mostrando los elementos mayores.

Una vez diseñado el dominio computacional y generada la malla numérica, se puede comenzar el trabajo de validación numérica del puerto de Lastres a través del modelo MANOLO. Únicamente resta descomponer el registro temporal de superficie libre del punto P1 en armónicos, frecuencias, y fases utilizando una transformación de Fourier (FFT). Se obtuvo un total de 7200 armónicos, periodos y fases para la serie utilizada a través de la descomposición FFT.

Se considera que el oleaje es totalmente unidireccional proveniente del Norte, esto se puede comprobar en las rosas de oleaje-dirección expuestas en Díaz (2002).

Únicamente se considera el mecanismo de disipación de energía por fondo tomando el valor de $f_f = 0.01$; recomendado en Díaz (2002), obtenido durante validaciones con el modelo MSP.

El tiempo total de la simulación numérica se hace coincidir con el tiempo del registro de campo, igual a $t=3600$ s . El incremento de tiempo numérico es igual a $\Delta t = 0.2$ s, obtenido con base en el número de Courant mostrado anteriormente en las recomendaciones, para un tamaño de elemento representativo igual a $\Delta x = 1.33$, que a su vez corresponde a 1/15 de la longitud de onda para el periodo mínimo $T=4$ s, en el interior de las dársenas $h=4$ m.

$$\Delta t = \frac{1.333}{\sqrt{9.81 \cdot 4}} \approx 0.2$$

Tras haber realizado la simulación con el modelo MANOLO, se obtienen los resultados comparativos de series temporales de superficie libre, series temporales velocidad U-V y presión en cada uno de los puntos numéricos de medición seleccionados.

Adicionalmente se presentan algunos mapas de superficie libre en el plano bidimensional así como vectores bidimensionales de velocidad U-V en el dominio para varios instantes de tiempo.

La simulación de 3600 s de olas realizada con el modelo numérico, requirió de 48 horas de ejecución. En esta caso particular, la simulación numérica requiere de un gran tiempo de ejecución, debido a la densidad de la malla empleada y al detalle del forzamiento

La figura I.12 muestra las comparaciones entre el espectro de energía medido y el espectro de energía obtenido numéricamente para los puntos exteriores P1, P3, P4, y los puntos interiores P6 y P7, mostrando una buena correlación.

Las comparaciones espectrales demuestran que el modelo numérico MANOLO, es capaz de representar adecuadamente el oleaje real y su transformación energética en los puntos exteriores e interiores del puerto de Lastres. El orden de magnitud y la posición de los picos se encuentra bien representada por el modelo.

Los sensores ubicados en el exterior del puerto P1 y P4, presentan una energía espectral de onda corta agrupada alrededor de la frecuencia de pico $f=0.1$ Hz.

En el punto P3, se puede observar que conforme los trenes de oleaje se propagan hacia el puerto, la energía espectral total tiende a moverse hacia frecuencias más bajas (rango de ondas largas), perdiendo el 95% de la energía en las frecuencias incidentes de onda corta, y transfiriendo cierta energía hacia frecuencias de onda larga menores a $f < 0.05$ Hz ($T > 20$ s). Esto se debe fundamentalmente al efecto de la difracción generada por el puerto.

Dentro del puerto de Lastres en los puntos P6 y P7 que corresponden a la primera y segunda dársena respectivamente, se observa cómo la energía de onda corta es prácticamente equivalente al 1.5% de la energía de onda corta en el exterior, a causa de los elementos de protección que funcionan adecuadamente para las oscilaciones de onda corta incidente. El punto P7, muestra la máxima transformación de energía registrada hacia frecuencias bajas, llegando prácticamente a desaparecer las oscilaciones de onda corta.

ANEXO I

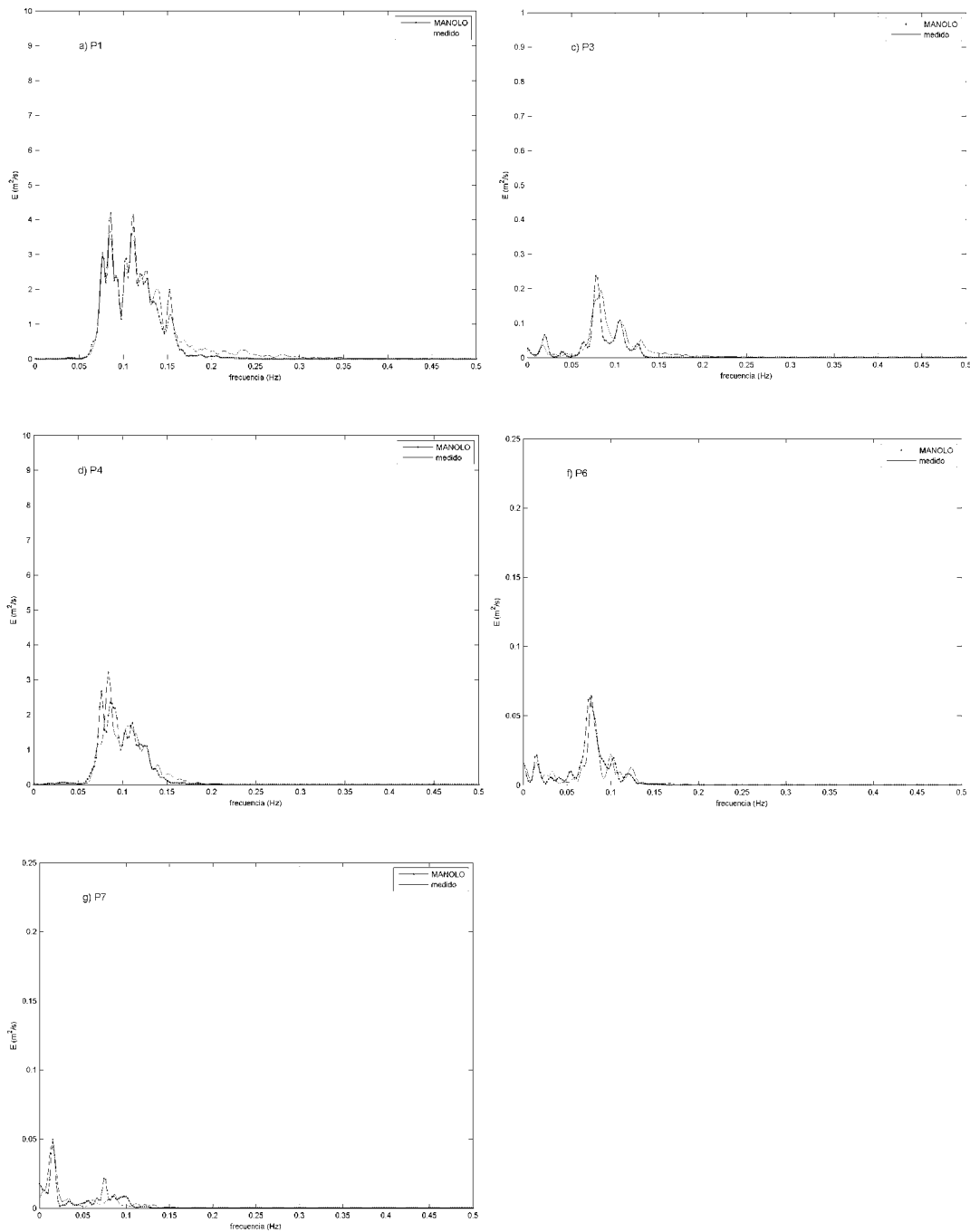


Figura I.12 Comparación de los espectros de energía, para el caso de validación del puerto de Lastres con el modelo MANOLO para 20/02/02; 15:00 horas. Escalas verticales variables.

Con el trabajo de validación mostrado en este apartado, quedan demostradas las capacidades del modelo MANOLO, capaz de realizar simulaciones de propagación de oleaje real, sobre contornos y batimetrías reales, obteniendo adecuadamente las transformaciones energéticas en los diferentes puntos en el interior y exterior del puerto.

La figura I.13, muestra los vectores de velocidades U - V en la superficie para el instante $t=115$ s, obtenido para el caso de calibración del puerto de Lastres. En la figura se puede observar que los máximos valores de velocidad horizontal U - V alcanzan aproximadamente alrededor de 1.5 m/s en la zona exterior Norte al puerto de Lastres. Esta zona es la que recibe la mayor energía a lo largo de la simulación y en gran parte protege, junto con el dique principal, las dársenas del puerto.

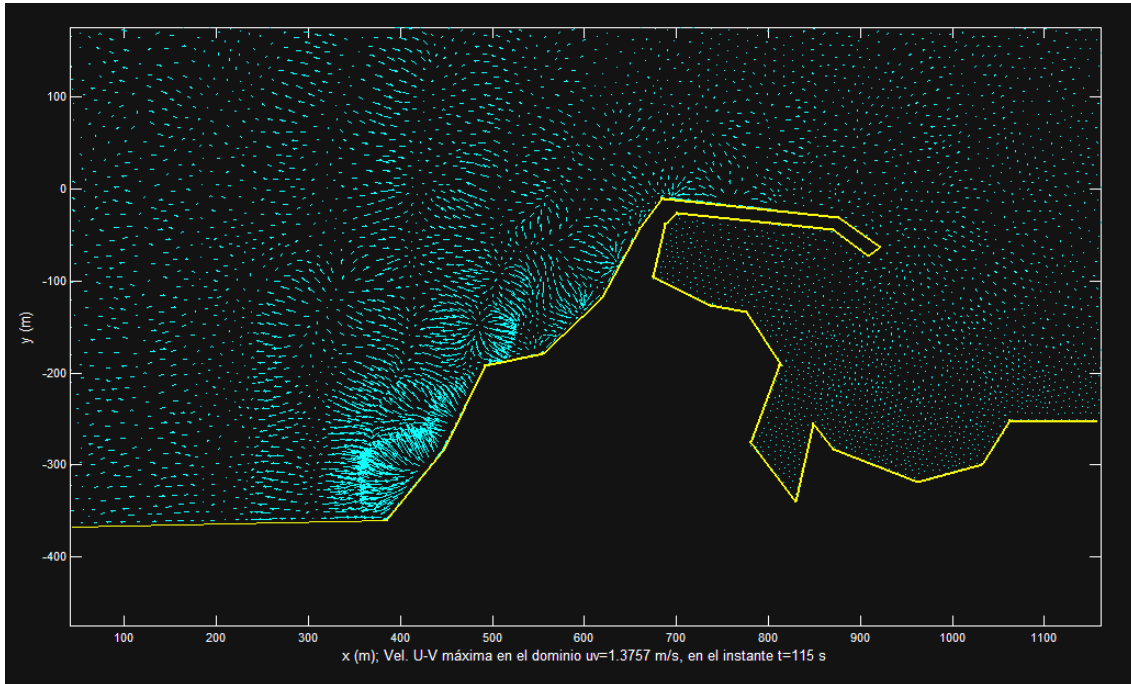


Figura I.13 Vectores horizontales de velocidad en la superficie libre U - V , para el instante $t=115$ s.

La figura I.14 muestra las series temporales de superficie libre obtenida en el pinto P1 (serie incidente) para los primeros 1800 s de simulación, así como las series temporales de velocidad en las direcciones U y V , y los valores de la presión en el fondo obtenidos con el modelo numérico.

En el punto P1 se puede observar la generación de la serie irregular de superficie libre generada por el modelo MANOLO. Como cabía de esperar, en el punto P1 los valores de velocidad en U (dirección principal de propagación), alcanzan valores de aproximadamente el doble de los registrados en la dirección V , el cual prácticamente no presenta valores significativos antes del tiempo $t=90$ s. Esto significa que existe una fuerte reflexión de las ondas desde los contornos reflejantes hacia la zona del sensor P1.

Los registros de presión en el fondo se mantienen prácticamente constantes alrededor de $P=155$ kPa, debido a que las oscilaciones de superficie libre son pequeñas con respecto a la profundidad en el sensor P1 (igual a $h=16$ m).

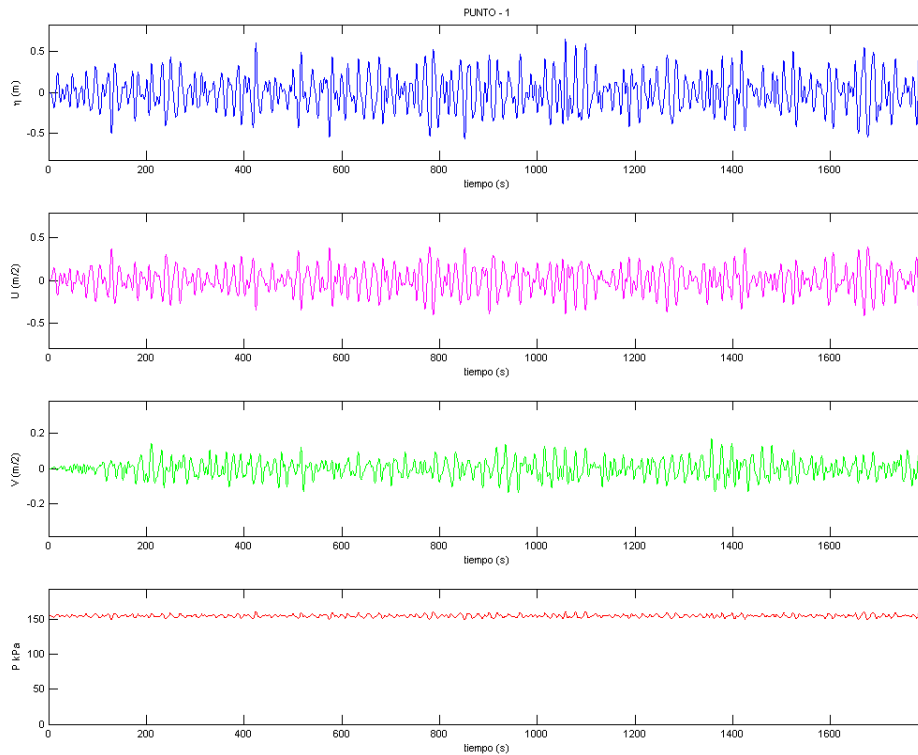


Figura I.14 Series temporales de superficie libre, velocidades U-V, y presión en el fondo para el punto P1.

A continuación, se prosigue con el estudio de resonancia no lineal en el puerto de Lastres a través de la utilización del modelo MANOLO, ya calibrado, y alimentado con las series temporales de superficie libre diseñadas con los espectros JONSWAP + onda larga mostrados en la figuras I.7 y I.8.

I.6.4 Simulación numérica de las series JONSWAP y onda larga, aproximación no lineal

En este apartado únicamente se presentan los resultados obtenidos para la simulación numérica realizada con el modelo MANOLO para el caso generado con los datos del primer modo resonante para la dársena 2.

Este caso se considera óptimo para ilustrar la metodología de realización de un estudio de resonancia portuaria real, debido a que es el caso que presenta los parámetros de oleaje de onda corta y onda larga más parecidos a los parámetros observados en las campañas de campo, además de que fue generado tomando el periodo de resonancia lineal $T=120$ s, con importante presencia en los espectros reales obtenidos dentro de las dársenas del puerto de Lastres.

Se decide respetar la configuración geométrica, el dominio numérico, las condiciones de contornos, la fricción por fondo, y los tiempos de simulación propuestos en el trabajo de validación expuesto anteriormente. Únicamente, se rediseño la malla en elementos finitos para el nivel cero de marea $m=0$ m.

La figura I.15 muestra los registros numéricos de superficie libre obtenidos en los siete puntos para la serie temporal generada con el espectro JONSWAP y energía de onda larga.

En la figura I.15, se observa que los valores de la amplitud de las ondas obtenidos numéricamente, son coherentes con los patrones observados en el trabajo de validación con las series de superficie libre reales medidas en campo.

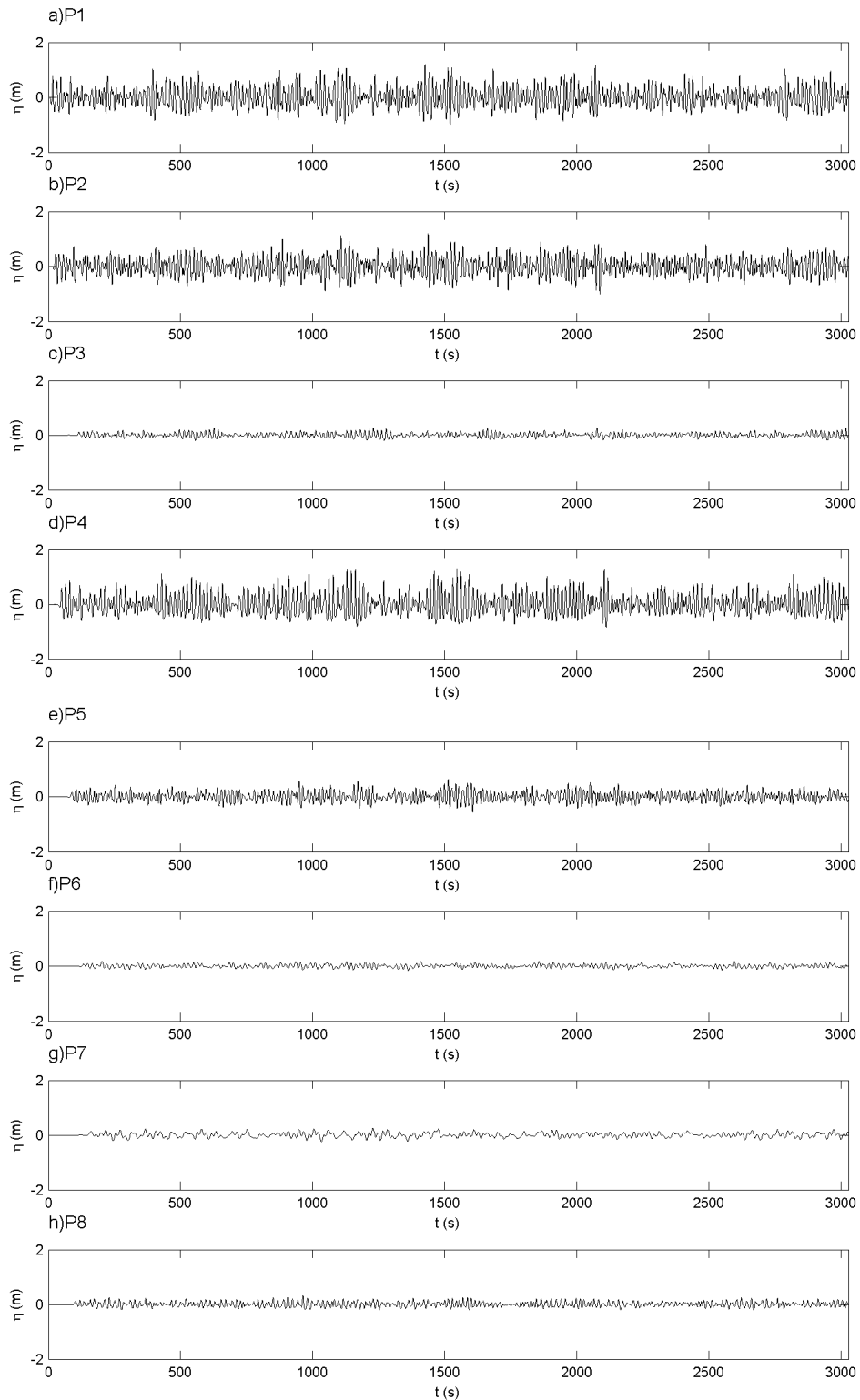


Figura I.15 Registros temporales de superficie libre obtenidos numéricamente, caso de espectro JOSNWAP + energía de onda larga de $T=120s$

Se observa que en la bocana P3, el oleaje ha perdido gran parte de su energía debido a las protecciones portuarias. De igual forma, en los puntos P6 y P7, correspondientes a la dársena 1 y 2 respectivamente, se observa que las oscilaciones son muy bajas con

respecto al oleaje exterior, mostrando oscilaciones de onda larga particularmente en el sensor P7.

En el punto P8, que esta localizado en la parte protegida del morro del dique principal, se puede ver un comportamiento similar al sensor P3 en donde la energía de onda corta no se ha disipado del todo por efectos de difracción del oleaje por presencia del dicho dique principal.

Para poder verificar las posibles transferencias de energía entre frecuencias, se presentan en la figura I.16 los espectros de amplitudes correspondientes a los registros numéricos de superficie libre observados anteriormente en la figura I.12.

Adicionalmente se presentan los espectros para el caso forzado únicamente con el espectro JONSWAP (sin energía de onda larga adicional), a fin de contrastar las posibles diferencias que se puedan presentar entre ambos casos.

Los espectros de energía muestran en el punto P1 (oleaje incidente) que la serie de superficie libre incidente fue simulada adecuadamente, mostrando la forma del espectro JONSWAP diseñado y el paquete de energía de onda larga incluido en el mismo.

En los puntos P2, P4 y P5 se observa prácticamente la misma forma espectral del punto de incidencia P1 con diferencias en sus contenidos energéticos. El punto P4 presenta un leve aumento de la energía en la frecuencia $f=0.15$ Hz, debido posiblemente a los fuertes efectos de reflexión y asomeramiento.

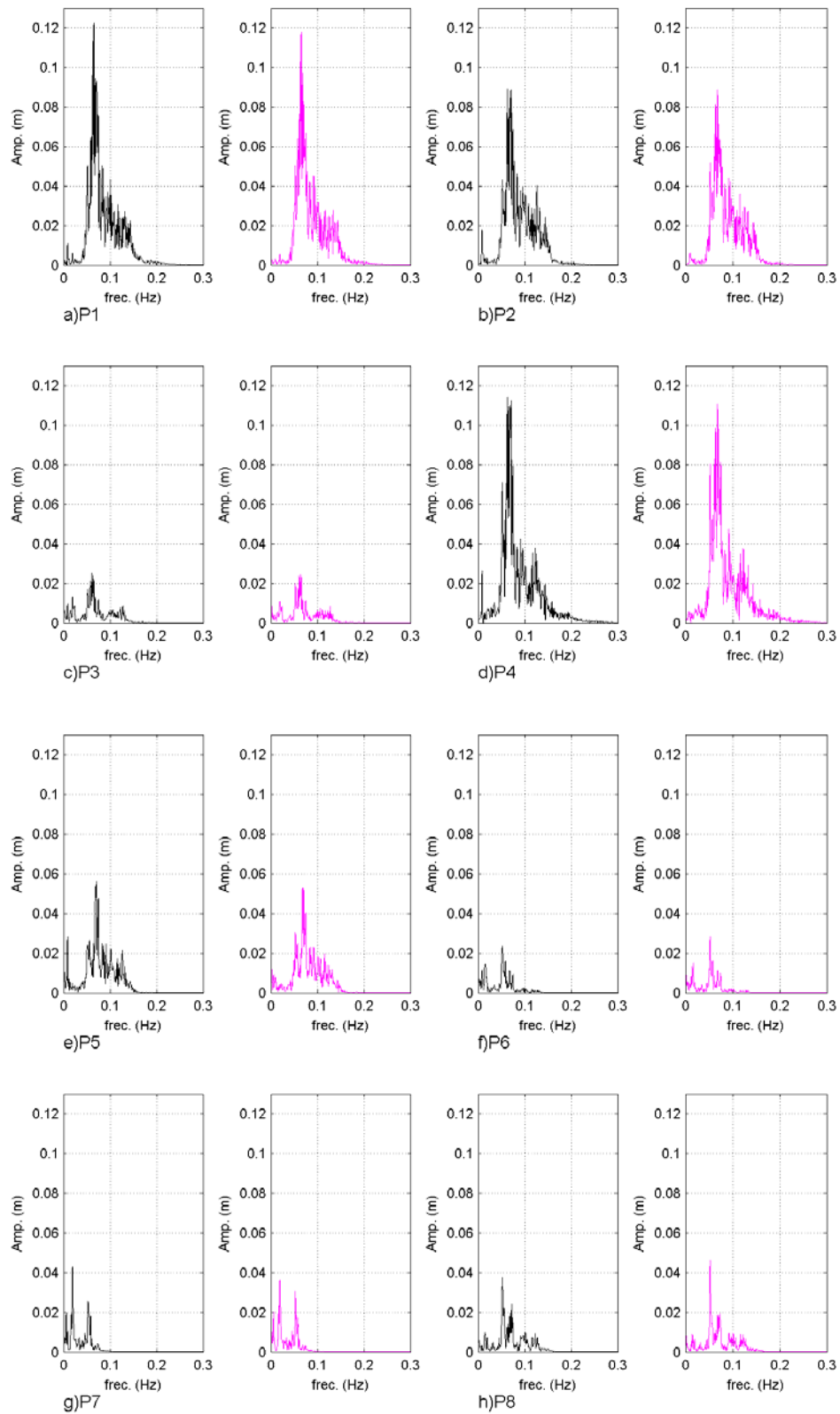


Figura I.16 Espectros de amplitudes para el caso JONSWAP + onda larga $T=120$ s (negro) y para el caso JONSWAP únicamente (magenta).

El punto P5, que es el punto más al Sur del dominio numérico, presenta un espectro similar al JONSWAP incidente disminuido energéticamente un 50%. Esto se debe posiblemente a que este punto se encuentra lo suficientemente alejado del contorno portuario como para verse afectado por las radiaciones y reflexiones del puerto y acantilados. Sin embargo, se aprecia un aumento de energía en la banda de onda larga, lo cual demuestra que el punto P5 puede estar afectado por las oscilaciones de baja frecuencia dentro de las dársenas.

Finalmente, los puntos P6, P7 y P8, localizados dentro de las dársenas del puerto de Lastres, muestran que la energía de onda corta se ha reducido en un 95% por efectos de difracción del oleaje al encontrarse con el dique principal (similar a lo observado en la figura I.12), mientras que, para la banda de ondas largas, se observa un aumento de energía específicamente en los periodos de 120 s y 150 s, con energías máximas equivalentes a 4 cm.

Adicionalmente si se comparan los espectros obtenidos en los ocho puntos para el caso JONSWAP y onda larga, con los generados únicamente con el espectro JONSWAP, se puede observar que los espectros para este último caso, prácticamente no presentan energía en el rango de las ondas largas en los sensores exteriores al puerto de Lastres.

Sin embargo, si se observan los sensores dentro de las dársenas (P6 y P7), se puede verificar la presencia de energía en frecuencias bajas (onda larga) para el caso únicamente forzado con el espectro JONSWAP, esta energía de onda larga es menor a la encontrada para el caso JONSWAP y onda larga. Esta situación pone de manifiesto que el modelo numérico MANOLO, es capaz de transformar la energía de onda corta hacia onda larga para los estados de mar artificialmente diseñados, aún cuando la energía en el forzamiento no presente energía en ambas zonas del espectro (onda corta y onda larga).

De forma adicional, los resultados obtenidos se pueden representar en forma de espectros *wavelet*, en donde además de observar las transferencias de energía entre componentes frecuenciales, se puede verificar la evolución temporal de los paquetes energéticos a lo largo de la ejecución.

La figura I.15 muestra la representación *wavelet* para el caso JONSWAP + onda larga $T=120$ s, para los puntos interiores P6 y P7 y el punto exterior P1.

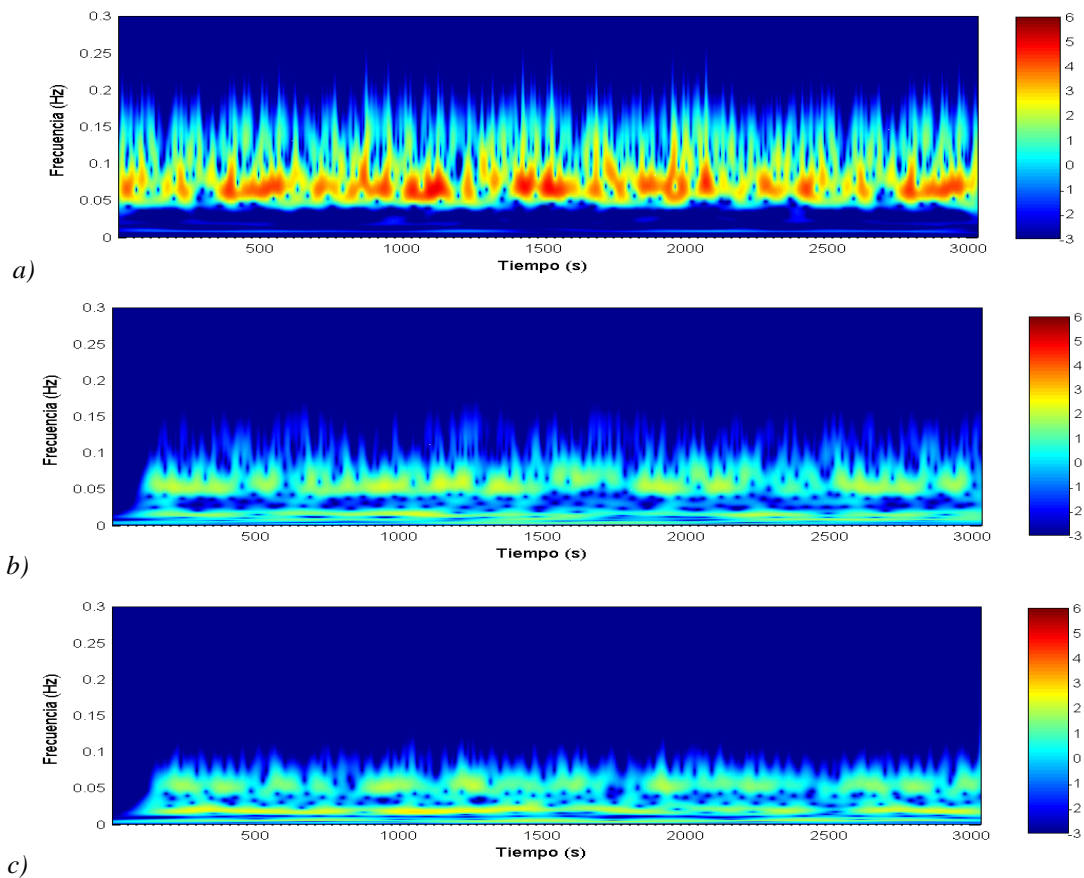


Figura I.17 Espectros wavelet para los puntos a)P1, b) P6 y c)P7 resultado de la simulación JONSWAP + onda larga $T=120$ s, con el modelo MANOLO.

En la figura I.17 se aprecia claramente la transformación en energía y en frecuencias que sufre el oleaje desde el punto incidente P1, hasta los puntos interiores P6 y P7.

Se observa que la serie de olas generada en el tiempo a partir del espectro JONSWAP y onda larga $T=120$ s, contiene paquetes de energía de onda corta que se agrupan y se propagan hacia las instalaciones portuarias, y además presentan una línea de energía de onda larga prácticamente constante en toda la simulación (energía añadida de onda larga).

Una vez dentro del puerto, el oleaje incidente ya ha perdido gran parte de su energía de onda corta debido a los procesos de reflexión, y difracción que sufre el oleaje al interactuar con el dique principal del puerto. Conserva únicamente algunos paquetes aislados de energía que cohabitan con las oscilaciones de onda larga que se han manifestado dentro de las dársenas.

Dentro de las dársenas del puerto de Lastres, la representación *wavelet* muestra que la transferencia de la energía de onda corta hacia onda larga, y la transformación de la energía de onda larga añadida al espectro incidente, presentan fuertes variaciones temporales. Por ejemplo, en el punto localizado en la dársena 2 (Punto P7), se observa que la energía de onda larga presenta tres paquetes bien definidos en diferentes posiciones temporales: el primero con una duración de aproximadamente 10 minutos, el segundo de 6 minutos y el tercero de 5 minutos.

Se puede observar también que el segundo paquete de energía de onda larga se presenta únicamente a 1.5 minutos del primer paquete de energía, mientras que el tercer paquete se presenta a los 18 minutos del segundo paquete de energía aproximadamente. Esta información temporal que se puede obtener con la técnica *wavelet*, demuestra el importante papel que juega la transitoriedad en las oscilaciones de largo periodo dentro de las dársenas, y nos aporta información sobre la duración y persistencia de cada episodio resonante.

Los espectros *wavelet* muestran la transferencia de energía de onda corta hacia onda larga, poniendo en evidencia que ésta no se mantiene constante a lo largo de la ejecución, ya que se ve afectada por los paquetes de energía de onda corta que logran penetrar en las dársenas del puerto.

Como era de esperar, la banda de onda larga más energética corresponde al periodo $T=120$ s, impuesto originalmente en el forzamiento exterior, que aparece amplificada especialmente en el sensor P7.

Para evaluar la acción de estas oscilaciones de onda larga dentro de las dársenas, se debe de obtener la respuesta de agitación del puerto, a través de la ecuación I.17 que corresponde al coeficiente de respuesta y en la que se realiza una ponderación entre el

espectro de energía en el exterior (punto P1) y los espectros interiores de cada dársena (puntos P6 y P7).

Las figura I.18 y I.19 muestran el resultado del análisis mencionado anteriormente, obteniendo el coeficiente de amplificación no lineal para la primera y segunda dársena respectivamente, en donde se presenta el coeficiente de amplificación no lineal para el caso forzado únicamente con el espectro JOSNWAP seleccionado.

Los coeficientes de amplificación no lineales obtenidos, consideran los efectos dispersivos, disipativos (fricción en el fondo), no lineales, bidimensionales y temporales debido a la transformación del oleaje que incide en las instalaciones portuarias. Este oleaje forzador incluye componentes de onda larga que pueden inducir resonancia.

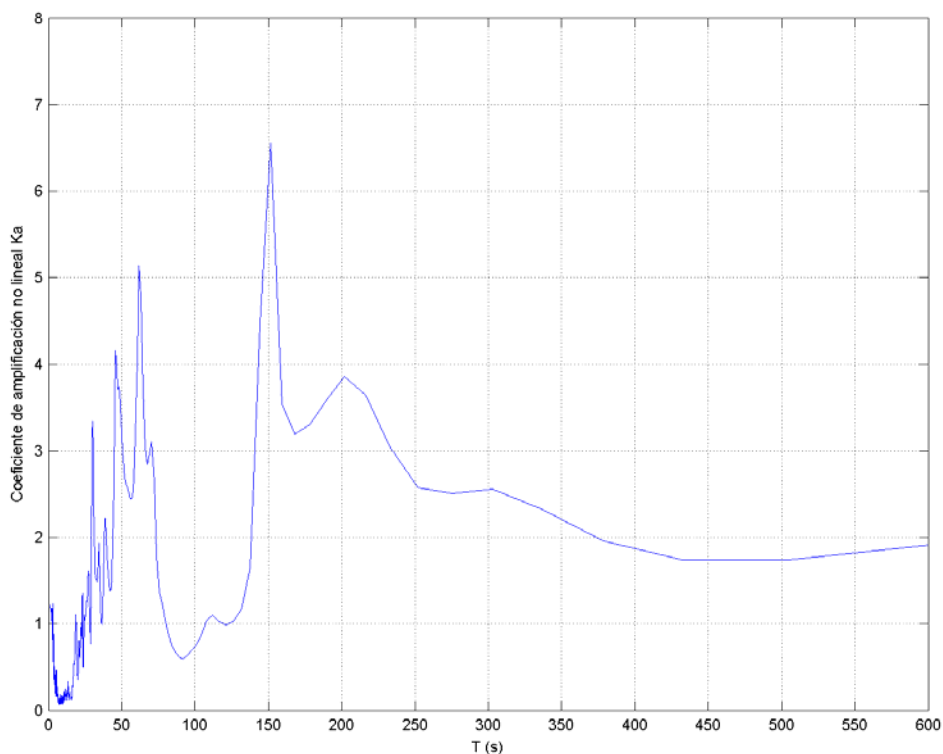


Figura I.18 Coeficiente de amplificación para la dársena 1 para JONSWAP + onda larga (línea y puntos azules), y para JOSWAP únicamente (línea azul), en el punto P6.

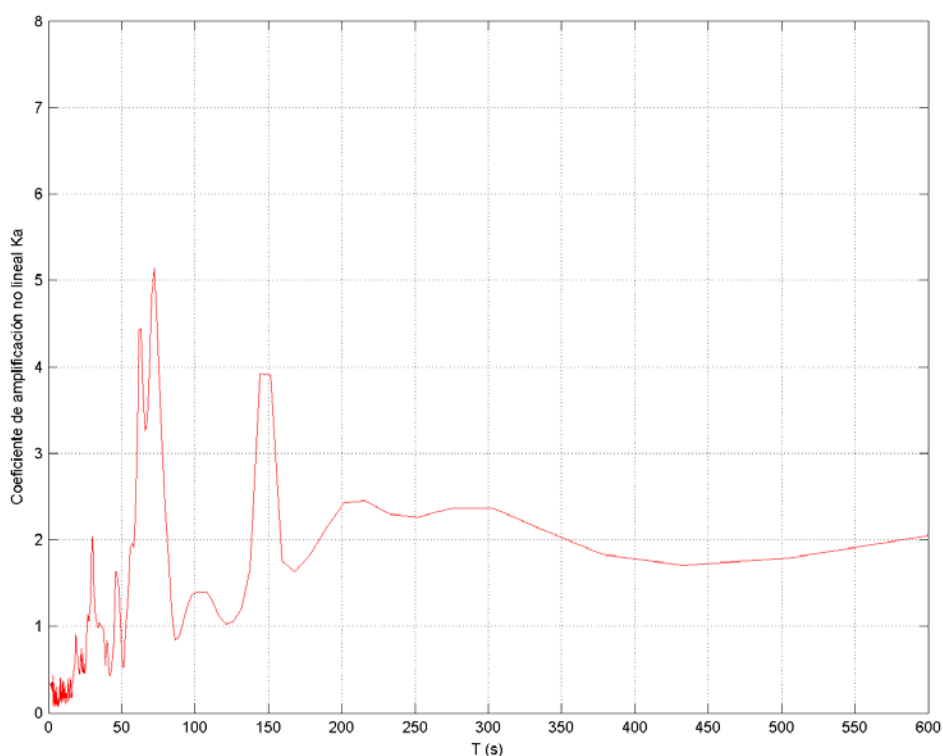


Figura I.19 Coeficiente de amplificación para la dársena 2 para JONSWAP + onda larga (línea y puntos rojos), y para JONSWAP únicamente (línea roja), en el punto P7.

Los periodos de amplificación no lineales obtenidos para cada dársena con el modelo MANOLO, coinciden con las mostradas en la figura I.3, obtenidas con el modelo MSP. Sin embargo, los valores de amplificación, obtenidas con el modelo MANOLO representan valores reales que se pueden manifestar en el puerto de Lastres.

Se observa que para la dársena 1, los periodos de resonancia a considerar son $T=150$ s y $T=52$ s, con una amplificación real máxima de $Ka=6$ y $Ka=5$ respectivamente. Para la dársena 2, se tiene que los periodos resonantes son $T=120$ s y $T=40$ s, con amplificaciones reales de $Ka=4$ y $Ka=5$ respectivamente.

Los valores de amplificación no lineales obtenidos para todo el rango de energía (onda corta y onda larga), se pueden utilizar como guía de diseño, mejora y gestión de dársenas para verificar los posibles efectos resonantes dentro de las dársenas. Además, si se realiza la simulación de un gran número de estados de mar que históricamente se han presentado en la zona de Lastres (por ejemplo, datos HIPOCAS), es posible obtener

un coeficiente de amplificación histórico basado en un modelo numérico que es capaz de simular procesos complejos de transformación de oleaje.

Finalmente, en la figura I.20 se muestran las representaciones tridimensionales de superficie libre para el caso simulado en este apartado JONSWAP y onda larga $T=120$ s, para diferentes tiempos de simulación. Para mostrar los complejos patrones bidimensionales de oscilación que el modelo MANOLO ofrece.

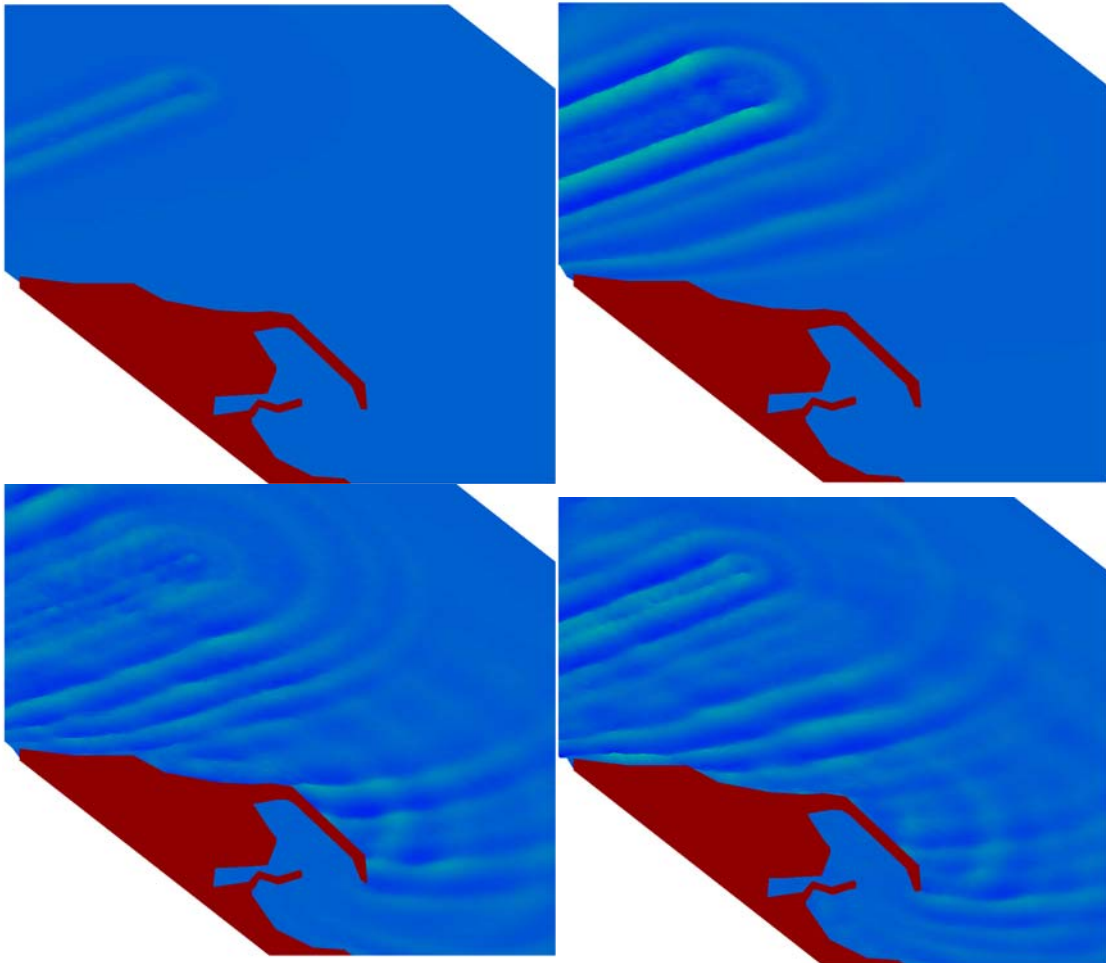


Figura I.20 Representaciones 3D del caso JONSWAP + onda larga 120 s, a cada 100 s. Realizado con el modelo MANOLO.

I.7 CONCLUSIONES

Este anexo se ha destinado a presentar una metodología integral para llevar a cabo estudios de agitación y resonancia portuaria, proponiendo una serie de pasos ordenados para identificar el problema a estudiar; evaluar las fuentes de información existentes; analizar dichas fuentes, y ponderar su utilización en función del tipo de estudio, seleccionando las herramientas numéricas adecuadas y facilitando así el trabajo del ingeniero de costas, y su capacidad de evaluar diversos procesos asociados a la agitación y a la resonancia en puertos.

Con ello se considera cumplido uno de los objetivos, que ha sido transferir la investigación desarrollada a la puesta a punto de una metodología y recomendaciones para llevar a cabo estudios de agitación y resonancia portuaria, que se desee realizar con mayor fiabilidad.

Se ha planteado una base de datos de partida necesarios para realizar cualquier estudio de agitación y resonancia portuaria, mencionando las bases de datos visuales, las bases instrumentales (boyas) y las bases provenientes de retro análisis tipo HIPOCAS.

Se han elaborado una serie de recomendaciones sobre la elección de la zona de estudio, los datos batimétricos, los datos hidrodinámicos, considerando las fuentes de datos existentes.

Posteriormente, se ha presentado la aplicación de las técnicas para la caracterización de los forzamientos que actúan sobre los puertos, el estudio de los valores característicos de los grupos de ondas, y la determinación empírica de los parámetros de onda larga a partir de registros de onda corta realizados en campo.

La elección de los forzamientos a ser utilizados en cada estudio se encuentra relacionada y resumida en una tabla, en las que se presentan los tipos de estudio a realizar, los datos de entrada que se requieren, los datos de salida que aportan y los objetivos generales que cumplen.

Posteriormente, en la metodología se ha presentado un procedimiento para seleccionar y aplicar los diferentes modelos numéricos de agitación, presentando también una tabla resumen que los relaciona con los objetivos de cada estudio a realizar, sus limitaciones matemáticas y físicas, sus usos más frecuentes, y los datos de entrada y de salida necesarias.

La metodología de aplicación de las herramientas numéricas se diseña con el objetivo de que el ingeniero de costas, pueda seleccionar fácilmente aquellas herramientas necesarias para llevar a cabo de forma eficiente y fiable, cualquier estudio de agitación portuaria. Desde el uso de una herramienta analítica para la identificación de los modos naturales de oscilación para dársenas con geometría simples; un modelo parabólico para propagar el oleaje desde aguas profundas hasta la zona de estudio; un modelo elíptico de propagación para obtener los modos resonantes y los patrones de agitación dentro y fuera de los puertos, y un modelo no lineal basado en las ecuaciones de Boussinesq que ofrece información detallada de los procesos del flujo asociados a la agitación y resonancia portuaria.

El tratamiento de los resultados obtenidos con la metodología presentada, aporta un conocimiento vital para el especialista, para poder gestionar los resultados, interpretarlos y aplicarlos a diferentes disciplinas que se encargan de estudiar la resonancia y la agitación portuaria.

El ejemplo de un estudio de resonancia portuaria en Lastres presentado, ha demostrado que la metodología se puede aplicar fácilmente y de forma directa, con un comportamiento adecuado de los modelos numéricos, y obteniendo resultados fiables.

Finalmente, cabe mencionar que el poder realizar estudios de resonancia y agitación en puertos con un modelo avanzado tipo MANOLO, que es capaz de simular el espectro completo de energía (onda larga y onda corta) los procesos no lineales y dispersivos; y contemplar diferentes mecanismos de disipación, bajo un ámbito bidimensional y resolviendo los valores de superficie libre, velocidades U-V, y presiones en el tiempo y en todo el dominio numérico, supone un avance importantísimo en este ámbito de trabajo.