

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

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el capítulo anterior se ha presentado una revisión de literatura en la que se ha recogido las diferentes metodologías y técnicas existentes para el estudio de la resonancia portuaria.

Particularmente, se ha visto que los mecanismos fundamentales que fuerzan la aparición de resonancia en puertos son las ondas baja frecuencia vinculadas a grupos de olas, los tsunamis, y la generación de oscilaciones o *seiches* debido a ondas inducidas por perturbaciones atmosféricas.

Se ha encontrado relativamente poco trabajo experimental en el laboratorio aplicado específicamente al estudio del fenómeno de resonancia portuaria debido probablemente a la complejidad inherente a la necesaria amortiguación o disipación de las ondas largas en los tanques de oleaje o a la falta de efectividad de los sistemas de absorción activa para gestionar las ondas largas no lineales. La mayor parte de los trabajos experimentales que involucran oscilaciones de baja frecuencia, se limitan a caracterizar las ondas largas libres y/o ondas largas vinculadas a grupos para aplicaciones en la zona de rompientes o al estudio de la dinámica sedimentaria en playas, quedando relegado a un segundo plano la interacción onda larga – estructura, y el estudio de las oscilaciones resonantes.

A este respecto cabe decir, que aunque los mecanismos de generación de onda larga a partir del oleaje son conocidos, nuestro conocimiento sobre las características de la onda larga generada a partir de un estado de mar determinado sigue basándose en aproximaciones semi-empíricas.

En el ámbito de la investigación el problema de la resonancia portuaria ha sido atacado con modelos no lineales en geometrías sencillas. Sin embargo, los estudios que se realizan actualmente sobre las oscilaciones de onda larga, en casos reales, con geometrías portuarias y batimetrías arbitrarias, limitan el análisis al ámbito de la teoría lineal, generalmente, con modelos estacionarios que consideran elementos forzadores unidireccionales y monocromáticos.

Es sabido que, en cuanto a la generación se refiere, los mecanismos de generación de onda larga a partir de onda corta requieren la resolución de ecuaciones no lineales. Más aún, los procesos de resonancia conducen, en general, a importantes sobre-amplificaciones en calados relativamente reducidos y, por consiguiente, a procesos no lineales que conducen a la transferencia de energía de unos armónicos a otros. De esto se deduce que el análisis resultante de la aplicación de modelos lineales ofrece una visión limitada y parcial del fenómeno.

Asimismo, se conoce que el fenómeno de la resonancia es un fenómeno transitorio cuya evolución en el tiempo es función del forzamiento y de la respuesta inducida por el puerto. Por ello, el uso de modelos estacionarios supone una importante simplificación del problema real.

Finalmente, cabe decir que para geometrías complejas en las que pueden coexistir dársenas con diferentes periodos propios, la posible interacción entre sistemas puede dar lugar a un sistema resonante muy diferente que el que cabría esperar si se consideran cada una de ellas de forma independiente. Este acoplamiento debido a la geometría, evoluciona en el tiempo hasta que queda totalmente establecido. Más aún, el resultado final del acoplamiento puede ser muy diferente a la respuesta inicialmente esperada si el proceso es no lineal.

Por todo ello, parece evidente que el estado del arte presenta importantes deficiencias, tanto en el ámbito de la investigación como en la práctica profesional, debido a la desconexión existente entre el estudio de la generación del forzamiento y el estudio de la respuesta del puerto; la falta de conocimiento sobre el fenómeno cuando se produce en condiciones de no linealidad así como del carácter transitorio del mismo, y finalmente sobre las modificaciones inducidas en la respuesta cuando se produce el acoplamiento entre dársenas o geometrías cercanas.

Por tanto, esta Tesis se centra sobre cuatro elementos fundamentales que se consideran insuficientemente estudiados o muchas veces obviados en el estudio de la resonancia portuaria: **generación, no linealidad, transitoriedad y acoplamiento geométrico.**

La investigación aquí recogida pretende ahondar, en mayor o menor medida, en el estudio de cada uno de estos elementos mejorando e integrando diversas **metodologías experimentales (laboratorio y campo), analíticas y numéricas** que conduzcan a una nueva visión sobre el análisis del fenómeno de resonancia portuaria.

3.2 OBJETIVOS

3.2.1 Objetivos generales

Con base en lo comentado en el apartado anterior, en el que se ha planteado el problema general, se considera necesario fijar los siguientes objetivos para mejorar nuestro conocimiento y capacidad de análisis y predicción del fenómeno de la resonancia portuaria.

- Desarrollar una metodología o técnica alternativa a las existentes que permita llegar a una mejor caracterización de las oscilaciones de onda larga, asociada al oleaje, a partir de registros instrumentales obtenidos en campañas de campo que sirva como base para mejorar nuestro conocimiento sobre el proceso de **generación** y forzamiento.
- Ampliar nuestro conocimiento y capacidad de caracterización y predicción de los procesos **no lineales**, **transitorios** e inducidos por el **acoplamiento geométrico** en los episodios de resonancia.
- Diseñar una metodología integral para llevar a cabo estudios generales de agitación y resonancia en puertos, incluyendo las técnicas analíticas y numéricas desarrolladas en esta Tesis que englobe la **generación**, **no linealidad**, **transitoriedad** y **acoplamiento geométrico** en el estudio del fenómeno y que abra nuevas perspectivas en el tratamiento de este problema.

3.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se plantean en esta investigación doctoral sobre el estudio del fenómeno de resonancia portuaria son:

1. Verificar y estudiar el estado del arte sobre las técnicas, metodologías, experimentaciones, y modelos numéricos involucrados a los estudios de agitación y resonancia en puertos.
2. Establecer una metodología para la caracterización de los elementos forzadores de la resonancia portuaria (onda larga) a partir de campañas de campo.
3. Diseñar y ejecutar trabajo experimental en el laboratorio que nos permita profundizar en el estudio y caracterización de los procesos no lineales, transitorios y de acoplamiento.
4. Presentar y validar intensivamente un modelo numérico avanzado, que sea capaz de simular de manera integral los procesos de transformación del flujo, los procesos no lineales, dispersivos, transitorios, y el los efectos debidos al acoplamiento geométrico, asociados al fenómeno de la resonancia portuaria.
5. Estudiar y reproducir numéricamente el fenómeno de resonancia portuaria para un sistema portuario real, y validar los resultados obtenidos con datos de campo.
6. Aplicar y contrastar la metodología integral desarrollada para realizar estudios de agitación y resonancia, mediante un estudio de resonancia en un puerto real, incluyendo forzamientos reales que incluyan oleaje irregular + onda larga.

3.3 METODOLOGÍA

La metodología a seguir en este trabajo se expone a través de la descripción detallada de los tres objetivos generales expuestos anteriormente.

a) **Objetivo 1**

*Desarrollar una metodología o técnica alternativa a las existentes que permita llegar a una mejor caracterización de las oscilaciones de onda larga, asociada al oleaje, a partir de registros instrumentales obtenidos en campañas de campo que sirva como base para mejorar nuestro conocimiento sobre el proceso de **generación** y forzamiento.*

Este primer objetivo, busca caracterizar las ondas infragravitatorias que son susceptibles de inducir episodios de resonancia en puertos, a través de 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 Gijón y en el Puerto de Lastres.

Una de las componentes fundamentales de la agitación portuaria es la debida a las oscilaciones de largo periodo también conocidas como ondas infragravitatorias. A menudo, este tipo de ondas son responsables de los episodios de resonancia y agitaciones extraordinarias, que dan lugar a periodos de inactividad en los puertos, esfuerzos importantes sobre las amarras de los buques, problemas de atraque, etc.

Además, el conocimiento de las ondas infragravitatorias es una parte fundamental de cualquier estudio de clima marítimo a realizar en la costa dado que forman parte del régimen de oscilaciones de cualquier playa.

La caracterización del clima marítimo debido a las oscilaciones de corto período es hoy en día posible gracias a las metodologías existentes para el análisis de datos obtenidos mediante boyas escalares y direccionales principalmente. Hay una base de datos adecuada para la determinación de la dirección, altura de ola y periodo, así como de sus estadísticos principales. Dichas bases de datos han permitido la obtención de funciones

de probabilidad de ocurrencia de los parámetros característicos del oleaje de corto periodo, y de la configuración espectral del mismo (forma en la que se distribuye la energía en las diversas frecuencias).

Esto, lamentablemente, no es aplicable a la onda larga. No existen estudios definitivos capaces de determinar, de la misma manera que para onda corta, una función de ocurrencia de las características de las ondas en estas frecuencias así como un espectro tipo.

Por ello, la importancia de contar con una técnica sencilla que permita al ingeniero evaluar las características frecuenciales y energéticas de las ondas largas vinculadas a grupos de ondas cortas, supone un avance significativo en el campo del análisis de series temporales dentro de la ingeniería de costas, y especialmente dentro de los estudios de agitación y resonancia en puertos.

La metodología consistirá en el análisis de las series temporales registradas en los puertos de Gijón y Lastres, buscando las correlaciones existentes entre oleaje y ondas infragravitarias mediante la utilización de algunas técnicas nuevas como la basada en la técnica *wavelet*.

b) Objetivo 2

*Ampliar nuestro conocimiento y capacidad de caracterización y predicción de los procesos **no lineales**, **transitorios** e inducidos por el **acoplamiento geométrico** en los episodios de resonancia.*

La metodología necesaria para poder cumplir este objetivo se estructura en tres partes claramente diferenciadas. La complejidad del proceso requiere un estudio detallado y controlado de los diferentes aspectos involucrados. Por ello, se comienza mediante el diseño de una extensa labor de investigación experimental en el laboratorio donde las condiciones de generación y respuesta pueden ser debidamente controladas. Se propone una campaña experimental para analizar diferentes casos de resonancia portuaria, para un sistema acoplado de puertos trabajando bajo diferentes condiciones de onda

incidente (diferentes condiciones de no linealidad), y para una amplia gama de combinaciones geométricas (acoplamiento geométrico). Para cada caso considerado, se plantea una exhaustiva campaña de medidas, registrando series temporales en 18 puntos localizados en la zona exterior e interior de los puertos. El gran número de casos considerados, constituye una base fundamental para el análisis del problema y para la validación de modelos numéricos.

En la segunda fase de esta metodología se trabaja sobre la capacidad predictiva del fenómeno. Para ello, se trabaja sobre una herramienta numérica cuya capacidad de representar los fenómenos considerados es superior a lo existente hasta el momento.

El modelado de la resonancia portuaria, ha estado siempre condicionado por las limitaciones propias de los modelos hasta ahora utilizados, generalmente basados en ecuaciones de gobierno lineales, que no permiten la co-existencia de la onda corta y onda larga dentro de sus elementos forzadores o son incapaces de reproducir episodios resonantes con características no lineales.

La complejidad del fenómeno de la resonancia en puertos requiere de una simulación que integre perfectamente los procesos no lineales que comúnmente ocurren durante los episodios resonantes, las características dispersivas del flujo que se propaga hacia el puerto, los mecanismos básicos de disipación de energía como son la fricción por fondo y la rotura, el posible acoplamiento geométrico, y la transferencia energética entre componentes frecuenciales, especialmente entre energías de alta y baja frecuencia, todo esto bajo un esquema temporal de estudio.

Por esto, se elige el modelo MANOLO como herramienta de análisis de los procesos asociados a la resonancia portuaria, debido a que, en principio, este modelo supera muchas de estas carencias antes expuestas, y logra integrar el cúmulo de procesos dentro de sus ecuaciones de gobierno de forma inherente.

Sabiendo que las hipótesis del modelo numérico son lo suficientemente robustas para simular un fenómeno complejo como el de resonancia portuaria, en este trabajo de Tesis se presentan algunas de sus características generales, se calibran los parámetros

fundamentales, y se realizan las simulaciones de algunos casos teóricos que propone la literatura, para finalmente discutir los resultados.

A continuación, se realiza el trabajo de validación del modelo numérico MANOLO utilizando aquellos casos más representativos del fenómeno de resonancia portuaria, observados durante las experimentaciones en el laboratorio.

Una vez validadas las simulaciones de laboratorio con el modelo, se proponen una serie de casos adicionales que nos servirán para extender el estudio sobre los procesos físicos de la resonancia portuaria.

Finalmente, la tercera fase de esta metodología incluye la comparación con un caso real. Para ello, se propone la realización de una serie de simulaciones numéricas con el modelo de MANOLO, para el estudio de la resonancia en las calas naturales del Puerto de Ciutadella y Platja Gran, ambas ubicadas en la costa Oeste de la Isla de Menorca, en las Islas Baleares.

Estas formaciones naturales históricamente han sufrido importantes episodios de resonancia, a causa de variaciones atmosféricas que derivan en oscilaciones de largo periodo del nivel medio del mar denominadas rissagas.

Se eligen tres series de oleaje medidas en siete puntos al exterior y en el interior de las calas, cada serie presenta características energéticas bien definidas y eventos de agitación portuaria diferentes, que van desde un comportamiento de baja energía, hasta un importante evento de rissaga registrado con amplificaciones que alcanzaron los 2 m el fondo del canal del puerto de Ciutadella.

Una vez seleccionadas las series a modelar, se propone el diseño del dominio numérico utilizando datos detallados de los contornos y batimetría de la zona, se calibran los parámetros de generación absorción y disipación principales que requiere el modelo, y se comparan los resultados.

La razón fundamental para la elección de esta caso, que no es un caso común de resonancia inducido por onda infragravitatoria, es el hecho de que las campañas se

encuentras bien documentadas y existen varios trabajos en los que se ha hecho un análisis exhaustivo del fenómeno. Esto nos permite concentrar los esfuerzos, principalmente sobre el modelado numérico y la validación.

c) Objetivo 3

*Diseñar una metodología integral para llevar a cabo estudios generales de agitación y resonancia en puertos, incluyendo las técnicas analíticas y numéricas desarrolladas en esta Tesis que englobe la **generación, no linealidad, transitoriedad y acoplamiento geométrico** en el estudio del fenómeno y que abra nuevas perspectivas en el tratamiento de este problema.*

Este último objetivo es importante por dos razones fundamentales. Por un lado, significa la integración de todo el trabajo realizado a lo largo de esta Tesis y, por otro, constituye el elemento fundamental de transferencia tecnológica asociada a la misma.

En cuanto a la **generación**, 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 tratando de incluir en la metodología la técnica 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 realizados en campo, expuestos en el primer objetivo.

Una vez expuestos e identificados los elementos forzadores a utilizar en cada estudio, se presenta un procedimiento para evaluar los efectos de agitación y resonancia portuaria mediante la aplicación de modelos numéricos con el fin de evaluar nuestra capacidad predictiva del fenómeno. Para ello, se tratará de integrar desde los cálculos más sencillos hasta el modelado numérico más complejo posible. Con ello, se trata de cubrir las diferentes etapas de trabajo que van desde el prediseño hasta el proyecto final. Para ello, se partirá de la evaluación analítica de los periodos de oscilación para dársenas con geometrías sencillas, pasando a la aplicación y combinación de los

modelos numéricos lineales como el modelo MSP y no lineales, como el modelo MANOLO. En esta etapa, se deberá considerar los efectos de la **no linealidad, transitoriedad y acoplamiento geométrico**.

La metodología deberá incluir recomendaciones y técnicas de aplicación para modelar el dominio numérico, el tratamiento de la batimetría, los elementos forzadores, las condiciones de contorno, y las limitaciones que presenta cada modelo.

La metodología deberá incluir un resumen del tratamiento de resultados obtenidos a partir del análisis realizado y de las capacidades técnicas que este tipo de metodología ofrece para las diferentes áreas o disciplinas que es necesario cubrir en cualquier estudio de resonancia y/o agitación portuaria.

Finalmente, y con el fin de mostrar si la nueva metodología es adecuada, se realizará un trabajo de validación de la metodología diseñada, a través de un ejemplo de aplicación, al puerto de Lastres, para el que se cuenta con información de campo.

