

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 1
INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 Exposición de motivos

La resonancia portuaria es un fenómeno de oscilación de un cuerpo de agua semi-encerrado definido por un puerto, cuya característica fundamental es la de registrar niveles de agitación sobre-amplificados, de un gran contenido energético, de ocurrencia súbita, y generalmente de corta duración. El fenómeno se debe fundamentalmente a la coincidencia entre las frecuencias de oscilación naturales del cuerpo de agua, con aquellas frecuencias de oscilación de las ondas externas del océano que se propagan e inciden hacia el puerto, actuando éstas como elemento forzador.

Durante los episodios resonantes, la superficie libre del flujo sufre una sobre-amplificación extraordinaria en un lapso de tiempo corto dentro de las dársenas de los puertos, llegando en ocasiones a superar los niveles de francobordo establecidos en las dársenas portuarias, provocando así violentas inundaciones por efectos de rebase del flujo hacia las zonas protegidas colindantes a las dársenas, e inclusive llegando a destruir y dañar parte de las instalaciones portuarias en general, como son: instalaciones civiles y militares, bodegas, oficinas, viviendas, instalaciones turísticas y de recreo, e instalaciones propias de la actividad pesquera y deportiva.

Los daños materiales en el exterior de las dársenas portuarias se suman a aquellos que ocurren en el interior de éstas, principalmente por la rotura que experimentan los amarres de las embarcaciones durante los episodios de resonancia, debido a las tensiones extraordinarias que éstos sufren, haciendo que las embarcaciones colisionen entre sí sin control, llegando a registrar la destrucción total de un gran número de barcos en un solo episodio resonante, implicando importantes pérdidas materiales, y poniendo en riesgo cualquier actividad humana.

Diversos estudios se han encargado de categorizar y analizar los diferentes mecanismos forzadores del fenómeno de resonancia portuaria, encontrándose que las ondas largas vinculadas a los grupos de ondas cortas que se propagan y penetran hacia las instalaciones portuarias, son las que generalmente inducen los episodios de resonancia.

De igual forma, las fluctuaciones barométricas que promueven la generación de ondas largas por efecto del cambio del nivel del mar en zonas cercanas a los puertos, juegan un papel importante en el fenómeno de resonancia portuaria. Por último y en menor medida, se ha observado que los movimientos tectónicos en el lecho marino que transmiten parte de su energía hacia la superficie libre de los océanos, y que generan ondas largas que se propagan hacia las costas y puertos (tsunamis), pueden llegar a forzar importantes episodios resonantes.

Existen otros mecanismos que llegan a inducir al fenómeno de resonancia portuaria, que por ser menos frecuentes en la naturaleza son menos estudiados, se sabe que la acción de descargas fluviales extraordinarias en desembocaduras cercanas a las bocanas de los puertos, pueden llegar a forzar agitaciones sobre-amplificadas en las dársenas portuarias, de igual forma, las ondas largas generadas por el desprendimiento de importantes volúmenes de material en zonas de acantilados, o generadas por la rotura parcial de icebergs en las zonas polares, pueden llegar a excitar los puertos cercanos y a someterlos a un comportamiento oscilatorio resonante.

La resonancia portuaria es un problema grave dentro de la ingeniería marítima, que se manifiesta en muchos puertos alrededor del mundo, y que debido a sus características destructivas, se debe de realizar un tratamiento y estudio que siga una filosofía preventiva, buscando el proponer recomendaciones de diseño de las instalaciones portuarias, con el fin de garantizar unos niveles elevados de seguridad y operatividad portuaria.

Se debe de contar con una herramienta metodológica que se fundamente en diversas técnicas novedosas basadas en trabajos de medición en campo, experimentaciones en laboratorio, y modelaciones numéricas avanzadas, que permita al ingeniero marítimo el poder conocer todos los posibles efectos resonantes dentro y fuera de los puertos, en el dominio bidimensional, a lo largo del tiempo, y para un sin fin de condiciones físicas de agitación resonante.

Es muy importante que el diseño de los puertos que se realicen en un futuro, sigan la base metodológica que se propone en este trabajo de Tesis, y que se adopte ésta propuesta como una herramienta novedosa para el estudio del fenómeno de resonancia portuaria, buscando el ponderar los posibles efectos que en fenómeno conlleva, a fin de evitar su manifestación o bien, minimizar sus efectos.

Lamentablemente, en la actualidad existen muchos puertos en el litoral Español y alrededor del mundo que sufren el embate sistemático de los efectos resonantes, en parte debido a que dichos puertos fueron proyectados sin considerar la posibilidad de enfrentarse a eventos resonantes o bien, simplemente no contaron con las herramientas adecuadas para su estudio, sin mencionar aquellos que por su enclave morfológico particular, se ven inevitablemente expuestos a sufrir los efectos destructivos que acompañan a la resonancia en los puertos.

El no considerar la existencia del fenómeno de resonancia o el acarrear errores de diseño importantes en este sentido, supone que el puerto presentará importantes costes, una baja eficiencia del servicio, y una actividad portuaria inadecuada durante su vida útil, situación que exige realizar costosas actuaciones y mejoras en el diseño, las cuales requieren técnicas que ofrezcan soluciones ingenieriles exactas.

Esta grave situación se ve apoyada por la propuesta de investigación mostrada en este trabajo de Tesis sobre el estudio integral fenómeno de resonancia portuaria, con el fin fundamental de proponer técnicas avanzadas que refresquen la forma de acometer los estudios, actuaciones y mejoras en cuanto a problemas reales de resonancia en puertos.

1.2 ELEMENTOS A CONSIDERAR DENTRO DEL ESTUDIO DE LA RESONANCIA PORTUARIA

Tradicionalmente la resonancia portuaria ha sido estudiada a partir de técnicas y metodologías basadas en fuertes hipótesis simplificadoras, que en la mayoría de los casos truncan el entendimiento integral del fenómeno, dividiendo y aislando algunos de los procesos involucrados, e inclusive olvidando algunos otros que son determinantes a la hora de llevar a cabo el diseño de los puertos.

Tras una revisión exhaustiva de las técnicas y metodologías que se encargan de estudiar el fenómeno de resonancia portuaria, se han identificado cuatro elementos vitales que fundamentan la metodología propuesta en este trabajo de Tesis, hasta ahora poco estudiados en la literatura y que marcan las líneas de trabajo de esta investigación.

En primer lugar, se estudian los factores generadores físicos de las ondas como posibles elementos forzadores del fenómeno, a fin de establecer una técnica que identifique y caracterice cada uno de los mecanismos físicos que inducen el fenómeno de resonancia en puertos, con el objetivo inicial de asegurar la adecuada elección de dichos factores como base del diseño portuario, en segundo lugar se analizan las características temporales del fenómeno, su duración, y transitoriedad y el papel que éstas juegan en la definición de un proyecto portuario en términos de operatividad, uso y explotación, en tercer lugar se verifica la importancia de conocer y estudiar las características no lineales que el fenómeno presenta, las diferentes respuestas de agitación para diferentes grados de linealidad, definiendo las características dispersivas del flujo, y la acción de los mecanismos disipadores de energía durante los episodios resonantes, y por último, se realiza una observación y análisis de las características del posible acoplamiento geométrico entre dársenas portuarias durante los episodios de resonancia.

1.2.1 Generación

El diseño de cualquier puerto requiere, entre otros trabajos previos, el conocer perfectamente el clima marítimo de la zona de emplazamiento del puerto, a partir de registros históricos de oleaje y campañas de campo específicas, que a su vez alimenten a los modelos físicos y numéricos que se encargan de proporcionar una base de datos adecuada para llevar a cabo el proyecto en cuestión.

A fin de diseñar adecuadamente los elementos de protección de cualquier puerto, considerando el fenómeno de resonancia portuaria, se debe de realizar un trabajo de análisis sobre la base de datos obtenida, para identificar aquellos mecanismos forzadores que pudiesen inducir la ocurrencia de episodios resonantes durante la vida útil del puerto, para así proponer modificaciones oportunas en los calados, geometrías y orientaciones de dichos elementos portuarios, evitando que el fenómeno se manifieste, o intentando minimizar sus efectos.

La identificación adecuada de los mecanismos forzadores del fenómeno de resonancia en puertos es una asignatura pendiente, que hasta nuestros días no se ha realizado con el rigor suficiente, en buena parte debido a que las técnicas de análisis de las series temporales de oleaje que actualmente se utilizan, basan sus esfuerzos en el entendimiento de los procesos de onda corta ($T < 30$ s), mientras que los periodos que competen a la resonancia portuaria son aquellos superiores a $T > 30$ s en el rango de las ondas largas.

Se han logrado identificar en la literatura fuertes deficiencias a la hora de realizar el análisis de los factores físicos generadores del fenómeno de resonancia portuaria, particularmente en el trabajo de identificación, análisis, e interpretación de los elementos forzadores (onda larga vinculada a grupos, tsunamis, cambios barométricos, etc.), dentro de las series temporales históricas existentes, así como en los registros obtenidos en las campañas de campo.

Una identificación inadecuada y deficiente de los posibles elementos generadores del fenómeno de resonancia portuaria, arriesgaría el diseño final del puerto, llevándolo a un eventual fracaso operacional, lo cual arrojaría importantes costes innecesarios que pueden ser evitados antes de su construcción. Además si se considera que el dimensionamiento de los elementos de protección, volúmenes de dragado, áreas de navegación, y geometrías de las dársenas, estarían fundamentados en un dimensionamiento erróneo, que obligaría la realización de futuras actuaciones y mejoras.

El estudio e identificación de los factores físicos de generación del fenómeno de resonancia portuaria, es la base fundamental que sustenta la metodología integral propuesta en esta Tesis, ya que los resultados de este primer análisis, alimentan a los modelos físicos y numéricos, que a su vez arrojan la base de datos necesaria para el entendimiento del fenómeno, recordando que la calidad de los resultados finales de diseño depende directamente de una adecuada identificación de los factores físicos iniciales que generan el fenómeno.

1.2.2 Transitoriedad

La ROM 0.0 (Recomendaciones para Obras Marítimas) determina que todas las obras portuarias que se quieran diseñar y construir, deben de cumplir con unas funciones determinadas durante su vida útil, para que conserven ciertos niveles óptimos de funcionalidad y operatividad durante el tiempo que vaya a permanecer en servicio el puerto, durante el cual las características iniciales estructurales (seguridad), y de uso y de explotación, pueden perderse paulatinamente o de forma súbita, de forma temporal o definitiva, parcialmente o en su totalidad, por la acción de los mecanismos denominados modos de fallo y/o de parada operativa, que en nuestro caso particular corresponden a la ocurrencia de eventos resonantes dentro de las dársenas portuarias, a causa de los cuales la obra o alguno de sus elementos pueden quedar fuera de servicio por causas estructurales, o dejan de operar, o simplemente pueden llegar a reducir sus niveles de funcionalidad.

El procedimiento general que establece las bases del cálculo para la realización de proyectos de obras marítimas y portuarias establecido por la ROM 0.0, recomienda el realizar los trabajos de verificación de la fiabilidad de la obra ante la seguridad, de funcionalidad frente al servicio, y de la operatividad frente al uso y la explotación, para tres condiciones de trabajo, las normales, las extremas, y las excepcionales, siendo esta última condición en donde se puede clasificar la ocurrencia de episodios de resonancia en puertos.

Para evaluar la seguridad, el servicio, y el uso y explotación, de un puerto bajo efectos resonantes, la técnica propuesta por la ROM 0.0 requiere la obtención de una serie de datos que definan el comportamiento del fenómeno de resonancia portuaria a lo largo del tiempo, para así poder establecer términos de probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo en un intervalo de tiempo unidad, en una fase de proyecto, y la probabilidad conjunta de fallo de un tramo frente a la seguridad, el servicio, el uso y la explotación del puerto durante la fase de proyecto.

Dentro del uso y explotación del puerto durante la fase de proyecto, se define el concepto denominado modo de fallo y de parada operativa, en el cual la obra o alguno de sus elementos estructurales, deben de dejar de operar o bien, deben de reducir su nivel funcional a causa de un episodio resonante para que una vez que éste desaparece, la obra y sus instalaciones vuelven a estar en explotación con los requisitos especificados en el proyecto original.

Para caracterizar el modo de fallo o de parada operativa se deben de definir la forma o mecanismo en que se produce el fallo, y la relación funcional entre factores de proyecto del puerto que intervienen en el modo, la cual se puede establecer a través de mediciones en campo, experimentaciones o modelación numérica, con el objetivo de obtener los términos favorables y desfavorables que inducen o no el modo, los estados límites, y la clasificación temporal de los términos para clasificar el modo en permanente, no permanente, extraordinario e insólito en función de la probabilidad de excedencia y la persistencia de un valor umbral, que finalmente definirá los coeficientes y márgenes de seguridad de la obra.

En resumen, es necesario que las técnicas, de medición, de laboratorio, y numéricas que se utilicen para obtener la base de datos que describe el fenómeno de resonancia portuaria, contemplen la variabilidad de los procesos asociados en cada situación de resonancia a lo largo del tiempo, desde su formación, la observación de los procesos transitorios que involucra cada episodio, su duración, y su posterior desaparición.

En la actualidad prácticamente todos los estudios revisados al respecto, omiten las importantes diferencias que existen entre el realizar un análisis de resonancia portuaria desde un enfoque estacionario, con aquellos que siguen un punto de vista temporal y transitorio, situación alarmante ya que prácticamente todos los procesos físicos que aparecen durante un evento resonante, están condicionados por su ocurrencia en el tiempo, imponiendo un orden lógico en la respuesta física del puerto ante las acciones derivadas de los procesos asociados al fenómeno de resonancia, haciendo que los tiempos y magnitudes de cada evento, induzcan variaciones importantes en los valores que alcanzan las variables involucradas, como en los valores que registra la superficie libre, las corrientes, y los esfuerzos en los amarres de las embarcaciones durante un evento de resonancia portuaria.

1.2.3 No linealidad, Dispersividad y mecanismos disipadores

Los complejos patrones y magnitudes de oscilación que se observan dentro de las dársenas portuarias durante los episodios de resonancia, presentan fuertes características no lineales, de dispersión frecuencial, e importantes efectos de disipación, que deben de ser atendidos dentro de las técnicas de estudio del fenómeno de resonancia portuaria, particularmente a la hora de establecer aquellas ecuaciones destinadas a simular numéricamente los procesos asociados al fenómeno.

Las oscilaciones en las dársenas portuarias, tradicionalmente han sido estudiadas bajo un esquema que se basa en la teoría linealizada de onda larga, y que ha fundado la base de diversos métodos numéricos para el estudio de agitación en puertos con geometrías arbitrarias. Estos modelos son capaces de encontrar la respuesta resonante del puerto dentro de las frecuencias naturales de oscilación en las dársenas. Sin embargo, si se tiene una onda incidente de amplitud pequeña $a \ll L$, la amplificación resultante dentro

de las dársenas puede llegar a superar en un factor de 10, lo cual supera los alcances de la teoría lineal.

Existen diversos experimentos que se han encargado de estudiar la respuesta resonante de dársenas portuarias sobre fondo constante, mostrando que los modelos basados en teorías de ondas lineales, tienden a perder su validez conforme el sistema se mueve hacia aguas poco profundas, es decir, cuando aumenta el calado y/o cuando aumenta la amplitud de la onda incidente.

Los efectos no lineales que inmediatamente se observan durante los episodios resonantes, se reflejan en la aparición de armónicos de orden superior en las series temporales de superficie libre obtenidas dentro de las dársenas, generando complejos patrones de oscilación, resultado de las combinaciones asimétricas entre nodos y antinodos en la dársena.

En ocasiones la transferencia energética entre frecuencias por la interacción no lineal, hace que los armónicos de orden superior (particularmente el segundo armónico), cobren protagonismo sobre el primer armónico durante el evento resonante, y superen los valores de amplificación de éste último en los puntos más protegidos de las dársenas, en donde comúnmente se sitúa un gran número de embarcaciones, generando patrones de oscilación desordenados que comprometen la operatividad del puerto.

Además de los importantes efectos no lineales que se deben de considerar en el estudio de resonancia portuaria, los efectos dispersivos que experimentan las ondas durante su propagación hacia las zonas portuarias se deben de incluir dentro de la metodología integral de estudio del fenómeno.

Los mecanismos generadores del fenómeno de resonancia portuaria presentan fuertes características dispersivas, mostrando que las celeridades de ondas largas vinculadas a grupos de ondas cortas, ondas largas libres, y tsunamis, varíen conforme éstas se aproximen hacia las zonas portuarias y se muevan sobre fondos variables.

Si se desea simular adecuadamente el fenómeno de resonancia portuaria, es necesario que las ecuaciones que se utilicen para este fin, contemplen las características dispersivas de las ondas a lo largo de su propagación y transformación (refracción, difracción, reflexión y radiación), dentro de todo el dominio de estudio.

Adicionalmente, el fenómeno de resonancia portuaria involucra importantes procesos físicos de disipación de energía que limitan las magnitudes de oscilación y amplificaciones dentro y fuera de las dársenas portuarias antes, durante, y después de los episodios resonantes, afectando directamente la magnitud de las corrientes inducidas por las ondas en zonas de especial importancia como en la bocana de los puertos.

Básicamente existen dos mecanismos de disipación que cobran protagonismo durante los episodios de resonancia portuaria, el primero corresponde al efecto de pérdida de energía por efecto de estrechamiento del flujo que atraviesa la bocana del puerto, y el segundo corresponde a los efectos de disipación de energía por fricción en el fondo.

En forma general los modelos numéricos que tradicionalmente evalúan los valores de oscilación resonante dentro de dársenas portuarias, no consideran los efectos de disipación de energía, arrojando coeficientes de amplificación absurdamente elevados cuya existencia en prototipo sería imposible.

En resumen, este trabajo de Tesis ha identificado importantes carencias en la modelación numérica del fenómeno de resonancia, en cuanto a la consideración de las características no lineales y dispersivas que experimenta el flujo durante los eventos resonantes, así como la implementación numérica de los mecanismos disipadores de energía que afectan a las oscilaciones resonantes.

1.2.4 Acoplamiento geométrico

Gran parte de los trabajos que la literatura ofrece sobre el estudio de la resonancia portuaria a través de experimentaciones físicas, modelaciones analíticas y numéricas, se han llevado a cabo simplificando la complejidad geométrica de los contornos portuarios, llegando a resumir de manera importante las geometrías reales, realizando ensayos sobre polígonos rectangulares y cuasi-unidimensionales.

Son pocos los estudios que han realizado experimentaciones físicas para el estudio de las condiciones resonantes que respeten las dimensiones geométricas de un puerto real, en parte debido a la dificultad que conlleva el escalar los elementos forzadores de onda larga y los mecanismos de disipación que actúan sobre el flujo. De la misma forma, las simulaciones numéricas sobre agitación resonante existentes, generalmente realizan un suavizado en los contornos y batimetrías portuarias para facilitar el establecimiento del dominio numérico, y resumir los esquemas de solución espacial.

Un puerto real se conforma de un conjunto de dársenas acopladas geoméricamente, formando en ocasiones complejos contornos sobre batimetrías variables. Cada una de estas dársenas tiene sus modos naturales de oscilación propios, que al coexistir pueden llegar a interactuar, modificando los valores de oscilaciones resonantes, encontrándose que para algunos casos el acoplamiento geométrico de la dársena principal con dársenas más pequeñas pueden llegar a agravar el problema de resonancia, o en lugar de minimizar los efectos.

Cualquier modificación geométrica que se lleve a cabo en alguna de las dársenas del puerto, implica una afección directa en los patrones y magnitudes de las oscilaciones resonantes en el resto de las dársenas interconectadas, haciendo que el trabajo de diseño se torne complicado y requiera de una revisión detallada de un abanico amplio de situaciones resonantes bajo la acción de una gran gama de posibles mecanismos forzadores.

En la actualidad, el trabajo de diseño portuario que evalúa las condiciones y magnitudes resonantes, se gestiona con modelos que no consideran adecuadamente el posible acoplamiento entre dársenas, y que son incapaces de realizar con éxito la transferencia energética del flujo entre los diferentes cuerpos de agua, debido a que las ecuaciones que fundamentan a dichos modelos conservan características lineales, no dispersivas, y estacionarias, aunado a que generalmente no consideran ningún mecanismo disipador de energía del flujo.

Estas deficiencias se deben de subsanar con la aplicación de modelos de agitación más avanzados, que contemplen todos los procesos mencionados anteriormente, los resuelvan en un esquema temporal y arrojen resultados en dominios bidimensionales delimitados por contornos arbitrarios.

1.3 ESTUDIO DEL FENÓMENO DE RESONANCIA PORTUARIA

Como se ha mencionado anteriormente, la resonancia portuaria es un fenómeno complejo que involucra un gran número de variables, que implica importantes efectos temporales, no lineales, y dispersivos que deben de ser tomados en cuenta a la hora de establecer una metodología integral para el análisis del fenómeno y sus efectos sobre instalaciones portuarias.

La gran cantidad de procesos físicos que involucra el fenómeno de resonancia portuaria, hacen que la propuesta metodológica de esta Tesis siga tres caminos bien definidos, en primer lugar se realiza el estudio de los mecanismos generadores del fenómeno de resonancia portuaria a través de una propuesta análisis de diversas series temporales de superficie libre y presión medidas en campo durante las campañas de Gijón y Lastres, en segundo lugar se lleva a cabo una modelación física en laboratorio de una variada gama de situaciones resonantes sobre un sistema acoplado de dársenas portuarias, finalmente se estudia la posibilidad de aplicar un modelo avanzado de propagación de ondas, para realizar simulaciones de validación de los datos obtenidos en laboratorio y de datos registrados en el puerto de Ciutadella y Platja Gran, Menorca, para diversas condiciones de agitación y resonancia.

1.3.1 Análisis de series temporales medidas en campo

Como trabajo inicial de esta Tesis, se realiza una caracterización de los posibles mecanismos generadores del fenómeno de resonancia en puertos, a través de la identificación de las oscilaciones de onda larga en registros temporales de onda corta.

El trabajo consiste en analizar las características espectrales de las series temporales de superficie libre medidas durante las campañas realizadas en el puerto de Gijón y el puerto de Lastres, ambos ubicados en la costa cantábrica, sobre el litoral de la provincia de Asturias.

La caracterización de las oscilaciones de baja frecuencia (ondas largas), se realiza utilizando las técnicas espectrales que tradicionalmente se utilizan en cualquier estudio

de caracterización de oleaje. Se relacionan directamente los datos de altura de ola significativa y periodo pico espectral de la onda corta, con aquellos derivados de los espectros de onda larga, obtenidos tras el análisis espectral del total de registros temporales de ambas campañas de campo, para finalmente proponer una ecuación que correlacione dichos parámetros, considerando además el calado que guarda el sensor en el punto de medición.

Además de proponer una ecuación que correlacione los parámetros espectrales de onda larga y onda corta, se propone la utilización de la técnica de representación espectral tipo *wavelet*, la cual añade la dimensión temporal en la observación del espectro de energía, permitiendo así conocer las transferencias energéticas que se presentan a lo largo del registro temporal, logrando visualizar cuantitativamente aquellos paquetes de energía de onda larga inducidos por grupos de ondas cortas, las posibles transferencias de energía por efectos de transformación de oleaje, y las transferencias por efectos transitorios del flujo durante los episodios de resonancia portuaria.

El uso de la herramienta espectral *wavelet*, significa una mejora sustancial en las capacidades de análisis de series temporales en general, y particularmente ofrece un herramienta novedosa para la identificación de los mecanismos forzadores de resonancia portuaria, su inicio, duración, e intensidad, directa del tiempo.

1.3.2 Modelación física en laboratorio

Como segundo trabajo a realizar en esta Tesis doctoral, se propone el llevar a cabo una extensa serie de simulaciones físicas en laboratorio, a fin de contar con información específica sobre los procesos relevantes asociados al fenómeno de resonancia en puertos.

La realización de dichas simulaciones físicas, nace de la necesidad de contar con una base de datos lo suficientemente completa, que permita contar con el total de los procesos transitorios, no lineales, dispersivos, disipativos, y acoplados del flujo, para una amplia gama de episodios de resonancia con diferentes características y magnitudes de oscilación *a priori* definidas.

Trasladar las características del flujo y los contornos geométricos de un puerto prototipo hacia un modelo físico, requiere del planteamiento de una serie de hipótesis simplificadoras que condicionen la geometría de los contornos y elementos de protección del prototipo. Los límites físicos que generalmente imponen las instalaciones de laboratorio, es el factor determinante a considerar en trabajo de diseño, y escalado de los modelos físicos de puertos a simular en laboratorio.

La dificultad particular de realizar una modelación física en laboratorio del fenómeno de resonancia portuaria, radica principalmente en que el canal de oleaje destinado para la realización de las simulaciones, impone fuertes limitaciones geométricas particularmente en su sección transversal, ya que cuenta con una sección de únicamente 2 metros de anchura, mientras que su longitud supera los 50 metros, haciendo que la acción del flujo en paredes del canal sea determinante en las modelaciones, y la generación de oscilaciones transversales inducidas artificialmente ocurra con facilidad.

Esta limitante llevó a adoptar un contorno portuario sencillo que consiste en dos dársenas rectangulares paralelas, de fondo constante, con la capacidad de variar sus longitudes individuales, inspiradas en las formas geométricas que proponen las calas reales del puerto de Ciutadella y Platja Gran, situadas en la costa Oeste de la costa de Menorca, Islas Baleares.

El realizar los ensayos de laboratorio para esta investigación doctoral tiene como objetivo final generar una serie de condiciones de agitación resonantes dentro de una variada gama de configuraciones portuarias, bajo distintas condiciones de ondas incidentes. No es competencia de esta investigación estudiar directamente los procesos asociados al fenómeno de resonancia portuaria de los datos medidos en laboratorio, debido a las fuertes hipótesis simplificadoras adoptadas para la realización de las modelaciones físicas, que alejan la generalidad del estudio sobre condiciones reales de agitación portuaria.

La base de datos obtenida en laboratorio arroja información detallada sobre procesos bien definidos, como lo son la generación de los mecanismos forzadores del fenómeno de resonancia, las características transitorias del flujo, las características no lineales,

dispersivas, y de disipación de energía que se manifiestan durante los episodios resonantes, y el posible acoplamiento geométrico entre dársenas.

La finalidad última del trabajo de modelación física es la de alimentar el trabajo de validación del modelo numérico de agitación portuaria que se utiliza y forma parte de la tercera y última herramienta propuesta en la metodología integral del fenómeno de resonancia portuaria.

1.3.3 Modelado numérico del fenómeno de resonancia portuaria

En la última década, el estudio del fenómeno de resonancia portuaria se ha apoyado en diversos modelos numéricos de propagación de ondas, que simulan en menor o mayor medida algunos de los procesos físicos del flujo asociados a las oscilaciones que se presentan en los puertos durante eventos resonantes.

La literatura ofrece una amplia variedad de modelos matemáticos destinados a resolver problemas relacionados al estudio de la resonancia portuaria, que abarcan desde aplicaciones puramente científicas a través de modelos avanzados que resuelven complejos procesos de transformación del flujo oscilatorio a pequeña escala, generalmente con un alto coste computacional, hasta aplicaciones ingenieriles que ofrecen resultados rápidos prácticos, obtenidos con modelos analíticos y numéricos basados en ecuaciones simplificadas.

En general los modelos de propagación y transformación de ondas sobre dominios costeros se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles, de las cuales se derivan, con la ayuda de fuertes hipótesis simplificativas (con respecto a la viscosidad, turbulencia y dimensionalidad del flujo), todas las ecuaciones de gobierno que sustentan a los modelos numéricos que el estado del arte propone en la actualidad.

Los modelos que el estado del arte ofrece como posibles herramientas para el estudio de resonancia portuaria, se pueden agrupar en dos grandes familias: aquellos modelos que se basan en ecuaciones de gobierno linealizadas, e integradas en vertical, que son incapaces de simular las características dispersivas del flujo, y los modelos que utilizan

aproximaciones no lineales en las ecuaciones de gobierno, y que contemplan las características dispersivas del flujo.

Dentro del primer grupo se pueden enmarcar los modelos de ondas largas que utilizan las ecuaciones lineales de aguas poco profundas (*shallow-water equations*), los modelos de ondas cortas que se resuelven sobre fondo constante o modelos de Helmholtz, y los modelos basados en las ecuaciones hiperbólicas de la pendiente suave (*mild-slope equations*).

En los modelos de propagación del segundo grupo, se encuentran los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq (*classic, modified & extended Boussinesq equations*), y los modelos basados en las ecuaciones RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*).

Los modelos de Boussinesq existentes en la actualidad, se ordenan en función del límite de aplicación espacial que presentan cada una de las diferentes extensiones de la ecuación original de Boussinesq derivada inicialmente por Serré (1953) y Peregrine (1967), confinada originalmente al dominio de aguas someras.

El grado de no linealidad y dispersividad de cada sistema de ecuaciones de Boussinesq se determina con el coeficiente kh , donde k es el número de onda y h es la profundidad, factor que ha ido en aumento paulatino a través de la mejora en las técnicas de cálculo de la ecuación de dispersión lineal para diferentes variables de velocidad, alcanzando actualmente valores que permiten la solución de las ecuaciones de Boussinesq completamente no lineales y completamente dispersivas en todo el dominio desde aguas profundas (al aumentar el valor de h) hasta la línea de costa, situación que permite extender la solución numérica de los procesos de transferencia de energía no lineales y dispersivos hacia armónicos de orden superior (al aumentar el valor de k), por efectos conjuntos de asomeramiento, refracción, difracción y reflexión del flujo.

La selección de un modelo numérico que sea capaz de proporcionar información adecuada sobre las oscilaciones resonantes en puertos, debe de cumplir con ciertos criterios de operatividad y manejo, en función al trabajo que se desee realizar, los

tiempos de simulación requeridos (coste computacional), y al grado de detalle al que se quiera llegar en los resultados.

La metodología integral de análisis del fenómeno de resonancia portuaria propuesta en este trabajo de Tesis, requiere de un modelo que simule adecuadamente los procesos asociados a los episodios resonantes, dentro y fuera de las dársenas portuarias, que parta de una adecuada generación numérica de los mecanismos forzadores del fenómeno, sobre batimetrías reales, en un dominio bidimensional, y que ofrezca resultados temporales en cualquier punto dentro del dominio numérico, y que sea capaz de simular las características no lineales, y dispersivas del flujo que se propaga y transforma, además de contemplar los procesos generales de disipación de energía del flujo.

Tras una revisión de las características generales de todos los modelos numéricos mencionados anteriormente, se muestra en la tabla 1.1 un resumen de las características numéricas, esquemas de solución, mecanismos forzadores, mecanismos disipadores, características no lineales y dispersivas, así como las ventajas y limitaciones, que presentan los modelos numéricos.

En la tabla 1.1 se puede verificar que el modelo numérico más adecuado para incorporarse en la metodología integral del estudio de resonancia portuaria, es el basado en las ecuaciones modificadas de Boussinesq (*modified Boussinesq equations*), que se resuelve bajo un esquema bidimensional en elementos finitos con mallas no estructuradas y adaptativas, solución temporal, e incluye los procesos débilmente no lineales y dispersivos del flujo (hasta un factor $kh \leq 3$), capaz de trabajar con problemas de ondas monocromáticas, espectrales, ondas largas y series medidas en laboratorio y campo, permitiendo la acción de los mecanismos de disipación de energía por rotura, fricción en el fondo y factores de mezcla turbulenta asociados a la rotura.

Los modelos basados en las ecuaciones extendidas de Boussinesq (*extended Boussinesq equations*), aportan todas las características del modelo mencionado anteriormente (ecuaciones modificadas de Boussinesq), mejorando considerablemente tanto las características no lineales y dispersivas, como el rango de aplicación de las ecuaciones de gobierno ($kh \leq 30$).

Sin embargo, se tratan de modelos que aún exigen un coste computacional elevado, y que únicamente han sido validados para casos específicos de laboratorio, presentando además una pobre capacidad en el trabajo de adaptación de los elementos y mallas en contornos complejos, ya que al trabajar con mallas estructuradas bajo un esquema numérico en diferencias finitas, es necesario un gran número de elementos para definir adecuadamente el dominio numérico.

Adicionalmente, cabe mencionar que los modelos basados en las ecuaciones de la pendiente suave (*mild-slope equations*), se proponen como una herramienta práctica para el prediseño de los elementos de protección de los puertos, que permite al ingeniero identificar aquellos periodos claves de oscilación dentro de configuraciones portuarias reales, de una manera rápida y sencilla.

En resumen, la metodología de estudio de este trabajo de Tesis se enfoca en el manejo de un modelo numérico avanzado de ondas basado en las ecuaciones modificadas de Boussinesq débilmente no lineales y dispersivas, basado en un esquema bidimensional de mallas adaptativas y no estructuradas en elemento finitos, con la capacidad adicional de resolver procesos disipativos de energía.

El Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, ha desarrollado un modelo numérico basado en las ecuaciones modificadas de Boussinesq denominado modelo MANOLO, acrónimo de Modelo Avanzado NO Lineal de Ondas, que cumple con las características necesarias para simular adecuadamente los procesos asociados al fenómeno de resonancia portuaria.

Este trabajo de Tesis demuestra que el modelo MANOLO, es capaz de simular con éxito las agitaciones resonantes en puertos, con una adecuada representación de los procesos no lineales, dispersivos, y acoplados entre dársenas a lo largo del tiempo, que se presentan durante los episodios resonantes, a través de la validación de diversos casos de laboratorio de resonancia portuaria realizados con este fin, y de una simulación de diferentes eventos resonantes reales medidos durante la campaña de campo LAST-97, utilizando registros de superficie libre en ocho puntos de control situados en el exterior e interior del sistema de un sistema de dos calas naturales, correspondientes al puerto de Ciutadella y la playa Gran, situadas en la costa Oeste de la isla de Menorca, Islas Baleares.

Modelo	Características generales	Ventajas	Limitaciones	Conclusiones
Helmholtz equations Lee Miles & Munk (1961); Lee (1971); Marcos <i>et al.</i> (2003)	Esquema en diferencias finitas Modelo lineal, y no dispersivo Forzado con onda monocromática Dimensiones en X - η Sin disipación por fricción, sin rotura, solución atemporal	Solución analítica, resultados rápidos, identificación adecuada de las frecuencias naturales de oscilación	Solución lineal, no dispersivo, sin mecanismos de disipación, unidimensional, resuelve geometrías sencillas, atemporal, fondo constante	Adecuado para la determinación de los modos naturales de oscilación de cuerpos de agua con geometrías sencillas
Shallow water equations HI (1995), Chen (1993), GIOC (2000)	Esquema en diferencias finitas Modelo lineal / no lineal, y no dispersivo Forzado con onda larga / serie medida de onda larga Dimensiones en X - Y- η Disipación por fricción, rotura, solución temporal	Solución en el tiempo, admite contornos complejos, batimetría real, características no lineales del flujo, disipación por fondo	No simula ondas cortas, no dispersivo, poco detalle en los contornos del dominio numérico, mallas estructuradas	Adecuado para la simulación de resonancia portuaria generada por oscilaciones de ondas largas, que no contengan procesos de dispersión frecuencial de energía.
Parabolic Mild-Slope equations Berkhoff(1976) Kirby, (1988)	Esquema en elementos finitos Modelo lineal, y no dispersivo Forzado con onda monocromática y espectro TMA Dimensiones en X - Y- η Sin disipación por fricción, sin rotura, solución atemporal	Solución rápida, dominios grandes sobre batimetrías reales, solución bidimensional.	Atemporal, no dispersivo, batimetría con pendiente suave, no admite series de superficie libre medidas, para alimentar las simulaciones, y no admite procesos de reflexión de las ondas.	Adecuado para trasladar las características de los estados de mar en aguas profundas, a las zonas de estudio de forma rápida y práctica.
Elliptic Mild-Slope equations Berkhoff (1982), Liu (1990), GIOC (2001),	Esquema en diferencias finitas / elementos finitos Modelo lineal / no lineal, y no dispersivo Forzado con ondas monocromáticas / espectros Dimensiones en X - Y- η Disipación por fricción, rotura, solución atemporal	Solución rápida, admite dominios complejos con buena definición en los contornos, batimetría real, disipación por fondo, absorción parcial en los contornos, solución bidimensional	Atemporal, no dispersivo, batimetría con pendiente suave, no admite series de superficie libre medidas, para alimentar las simulaciones	Adecuado para identificar los periodos resonantes dentro de puertos reales, a través de la imposición de un ruido blanco dentro del dominio numérico. Se recomienda su uso en el pre-diseño de los elementos de protección de los puertos.
Classical Boussinesq Peregrine (1967)	Esquema en diferencias finitas Modelo débilmente no lineal; $kh \leq 0.8$, y débilmente dispersivo; $kh \leq 1.2$ Forzado con ondas monocromáticas Dimensiones en X - Y- η . Sin disipación por fricción, sin rotura, solución temporal	Solución bidimensional, no lineal, dispersivo, modelo temporal	Limitado aguas poco profundas, sin mecanismos de disipación	Modelo en desuso, debido a la fuerte limitación espacial que tiene.
Modified Boussinesq Nwogu (1993); Madsen <i>et al.</i> (1991); Woo & Liu (2004)	Esquema en diferencias finitas / elementos finitos Modelo débilmente no lineal; $kh \leq 3$, y débilmente dispersivo; $kh \leq 3$ Forzado con ondas monocromáticas / espectros / serie medida / onda larga. Dimensiones en X - Y- η Disipación por fricción, rotura, solución temporal	Solución bidimensional, no lineal, dispersivo, modelo temporal, mallas adaptativas, mecanismos de disipación (rotura, fricción por fondo y factores de mezcla turbulenta), batimetría real	Tiempos de simulación elevados para dominios complejos, kh pequeño, lo cual limita la solución de todo el rango de frecuencias	Adecuado para el estudio ingenieril de resonancia portuaria sobre contornos y batimetrías reales. Contempla los procesos no lineales, y dispersivos del flujo en un dominio bidimensional a lo largo del tiempo. Admite mecanismos de disipación. Se puede tornar lento para dominios computacionales grandes
Extended Boussinesq (Wei & Kirby (1995); Agnon <i>et al.</i> (1999); Madsen & Agnon (2003)	Esquema en diferencias finitas Modelo completamente no lineal; $kh \leq 30$, y completamente dispersivo; $kh \leq 30$ Forzado con ondas monocromáticas / espectros / onda larga Dimensiones en X - Y- η Disipación por fricción, rotura, solución temporal	Solución bidimensional, no lineal, dispersivo, modelo temporal, mecanismos de disipación (rotura, fricción por fondo y factores de mezcla turbulenta), batimetría real, kh grande	Tiempos de simulación elevados para todos los dominios, mallas regulares no adaptativas (número excesivo de elementos)	Adecuado para el estudio científico de resonancia portuaria sobre contornos y batimetrías reales. Contempla los procesos no lineales, y dispersivos del flujo en un dominio bidimensional a lo largo del tiempo. Admite mecanismos de disipación. Su aplicación ingenieril se ve condicionada por el excesivo coste computacional en la solución del esquema numérico y temporal
RANS Van Gent & Petit (1994), Van Gent (1995); Lin & Liu (1998a, 1998b)	Esquema en elementos finitos Modelo no lineal y dispersivo Forzado con oleaje monocromático / espectral / serie medida Dimensiones en X - η Disipación por fricción, rotura, solución temporal	Resuelve completamente las ecuaciones de Navier-Stokes, batimetrías complejas, modelo en dos fases (agua-aire).	Necesidad de calibración de factores de estabilidad, unidimensional, tiempos de simulación excesivos	Modelo inadecuado para estudios ingenieriles por elevado su coste computacional. Se puede utilizar para es estudio de procesos de disipación de energía específicos como lo es el chorro de descarga en las bocanas de los puertos y el posible rebase por sobre-amplificaciones resonantes

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Para el estudio integral de las oscilaciones portuarias y del fenómeno de resonancia portuaria, esta Tesis doctoral se organiza en nueve capítulos que se describen brevemente a continuación:

El capítulo 2 realiza una revisión bibliográfica de los trabajos relacionados con la agitación y la resonancia portuaria, en cuanto a los estudios generales de observación y medición del fenómeno, el estudio de los grupos de ondas y ondas largas, los fenómenos meteorológicos asociados a las oscilaciones resonantes, los estudios experimentales de laboratorio existentes relacionados a las oscilaciones portuarias, y los diferentes modelos numéricos aplicados a estudios de agitación y resonancia portuaria que la literatura ofrece. Con esta revisión se busca identificar los puntos débiles que la literatura presenta, para posteriormente plantear los objetivos específicos de este estudio.

El capítulo 3 expone el planteamiento del problema general, y los objetivos generales y específicos que sustentan esta investigación doctoral, con base en lo observado en los capítulos primero y segundo.

El capítulo 4 establece una técnica de análisis de series de oleaje irregular medido en campo, que sirve para caracterizar las ondas largas vinculadas a los grupos de ondas cortas (oleaje irregular), buscando ofrecer de esta forma una técnica de identificación y caracterización de los posibles elementos forzadores de episodios de resonancia portuaria. Dicha técnica se aplica directamente en medidas de oleaje real realizadas en dos campañas de campo en el mar Cantábrico (campañas de Gijón y Lastres). De forma adicional, en éste capítulo se plantea la utilización de una vía alternativa para el análisis de la energía de baja frecuencia (ondas largas), vinculada a las series temporales de superficie libre de onda corta, a través de la técnica de descomposición espectral-temporal tipo wavelet, con aplicación directa en series de campo, laboratorio y análisis de resultados numéricos.

En el capítulo 5 se realiza una descripción detallada de los ensayos realizados en laboratorio, para la obtención de las series de datos destinadas a la validación del modelo numérico. Se presenta el diseño y construcción, las técnicas y equipo de medida utilizados, análisis de calidad y el pre-proceso de análisis de las series de datos. Se busca que los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio, expongan claramente la complejidad que el fenómeno de resonancia implica, además de ofrecer un importante y valioso número de series temporales de superficie libre para diversas condiciones resonantes y no resonante, destinadas al trabajo posterior de validación del modelo numérico MANOLO.

En el capítulo 6 se presenta el modelo numérico MANOLO, sus ecuaciones de gobierno, sus esquemas de solución especial y temporal, y sus límites físicos de aplicación. Adicionalmente se presenta el trabajo previo de validación del modelo numérico para diferentes caso teóricos existentes en la literatura, y las técnicas y recomendaciones de calibración de cada caso simular, como parte fundamental dentro del desarrollo del modelo.

El capítulo 7 presenta la modelación numérica de los ensayos realizados en laboratorio, con la finalidad de validar el modelo MANOLO para los episodios de resonancia observados en el modelo físico. Se busca con este trabajo, identificar las capacidades y limitaciones que presenta el modelo numérico, y evaluar la calidad de resultados y los procesos del flujo que se obtengan para diferentes situaciones de resonancia, no linealidad, y acoplamiento geométrico entre dársenas.

El capítulo 8 se encarga de evaluar y validar el comportamiento del modelo numérico MANOLO, para un estudio de resonancia en un puerto real. En este trabajo de validación numérica se consideran contornos portuarios reales, batimetrías, y series de superficie libre medidas en campo durante la campaña LAST-97, llevada a cabo en el puerto de Ciutadella y la cala de Platja Gran, localizados en la costa Oeste de la Isla de Menorca. El objetivo de este trabajo, es validar y demostrar que el modelo numérico MANOLO es una herramienta adecuada para llevar a cabo estudios de agitación y resonancia portuaria, bajo condiciones reales.

En el capítulo 9, se plantean las conclusiones del trabajo de Tesis y las posibles futuras líneas de trabajo a seguir.

Finalmente, al final de la Tesis se presenta un anexo que plantea una metodología integral para realizar estudios de agitación y resonancia en puertos. Con el objetivo de integrar las técnicas de análisis de series de datos y la herramienta numérica (modelo MANOLO) presentadas en esta Tesis, dentro de una metodología completa que permita al ingeniero de costas llevar a cabo cualquier estudio que involucre los procesos de oscilación y resonancia en puertos. En este anexo se presentan las fuentes de información existentes, las técnicas de análisis de los datos, la identificación de los elementos forzadores de cada estudio particular, y las herramientas numéricas existentes (incluyendo el modelo MANOLO), exponiendo sus limitaciones y capacidades para los diferentes estudios relacionados a la agitación y resonancia en puertos, a los que generalmente la ingeniería de costas se enfrenta. Dentro de dicha metodología se presentan recomendaciones que facilitan el uso de las diferentes herramientas analíticas y numéricas, y adicionalmente se presentan una serie de estrategias y recomendaciones para la interpretación de los resultados obtenidos en la metodología. Finalmente se presenta un ejemplo de aplicación de la metodología integral aplicada a un estudio de resonancia portuaria en el puerto de Lastres, localizado en la costa del Principado de Asturias.

CAPÍTULO 1.