

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 7
MODELADO NUMÉRICO DE LOS CASOS
EXPERIMENTALES

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se intensifica el trabajo preliminar de validación comenzado en el capítulo anterior. Hasta el momento, se ha trabajado en la validación del modelo con casos clásicos experimentales y teóricos, obtenidos de la literatura, y que sirven de base para la puesta a punto de cualquier modelo de propagación. Sin embargo, en este capítulo se va a acometer un proceso de validación mucho más exigente y orientado fundamentalmente a estudiar las capacidades del modelo a la hora de analizar procesos de resonancia no lineal, donde el acoplamiento geométrico y la transitoriedad sean factores importantes.

El capítulo comienza con un estudio con el que se pretende dar una serie de recomendaciones generales relativas a cómo se debe proceder a la hora de construir cualquier caso numérico. Para ello, se utilizará la información relativa a un caso experimental. Este estudio es muy importante pues simplificará notablemente la construcción del resto de los casos considerados en la validación y proveerá de una serie de reglas de buena práctica que serán incluidas en la metodología final de aplicación del modelo o en el manual del usuario correspondiente.

Esta validación inicial, será la base fundamental para proceder a la segunda parte del capítulo en la que se recoge una exhaustiva validación del modelo basado en la comparación de los resultados numéricos con el trabajo experimental descrito en el capítulo 5.

Para ello, se seleccionan una serie de casos que se consideran representativos de las diferentes geometrías, forzamientos y respuestas recogidas en todos los casos experimentales analizados. Cada uno de estos casos es estudiado mediante la comparación entre las series temporales de superficie libre, observadas y calculadas, así como los espectros de amplitudes, en todas las localizaciones en las que se han realizado medidas.

Con base en esta información, se comprueba la bondad del modelo numérico y se analiza la fenomenología de los procesos observados en cada caso. Para ello, se introduce alguna nueva herramienta de análisis que no es utilizada habitualmente como la transformada wavelet.

Con la información numérica y experimental, se hace un análisis más detallado en el que se comparan diferentes casos entre sí, con el fin de detectar como varían los procesos observados en función del forzamiento, la geometría o los niveles de acoplamiento detectados.

Finalmente, se utiliza el modelo numérico como herramienta para complementar el estudio experimental, procediendo a la ejecución de nuevas geometrías y al estudio de variables que no han sido medidas en los ensayos.

El capítulo finaliza con unas conclusiones y recomendaciones en cuanto a las posibles mejoras que se deben introducir en el modelo numérico.

7.2. CONFIGURACIÓN DE LOS CASOS NUMÉRICOS Y CALIBRACIÓN PRELIMINAR

En el capítulo anterior se presentaron los trabajos de validación del modelo numérico para casos teóricos de agitación de ondas en cuerpos de agua semi-encerrados, y con datos experimentales tomados de la literatura.

Los resultados de la validación fueron satisfactorios, en especial aquellos realizados para los casos teóricos que estudian las características lineales, y no lineales del fenómeno de la resonancia portuaria.

En este apartado, y con base en los datos experimentales obtenidos en esta Tesis se elabora de manera preliminar un nuevo trabajo de validación, mucho más detallado. Para ello, se eligen las dimensiones del dominio computacional, los tiempos de simulación, las características del sistema de generación de ondas dentro del dominio, y el diseño de las características de la zona de radiación y absorción de energía oscilatoria hacia el exterior del dominio.

Este nuevo trabajo de calibración y validación se basa en las recomendaciones de pre-diseño, dimensionamiento, estabilidad numérica, filtrado espacial y temporal del esquema de solución numérica, y elección de los elementos forzadores, recopiladas para todos los casos simulados en el trabajo anterior realizado con el modelo numérico.

Este apartado se dedica, fundamentalmente, a la calibración de los parámetros físicos y geométricos que el modelo numérico utiliza, como parte del trabajo de selección de aquellas variables independientes que conducen a una calidad óptima de ajuste entre valores numéricos y series de datos reales medidos en laboratorio.

En primer lugar, se presenta el trabajo relacionado con el diseño del dominio numérico. Se consideran diferentes calidades de malla en elementos finitos, incluyendo también el proceso de diseño y elección de las dimensiones óptimas de la zona de absorción del oleaje. Posteriormente, se analizan los parámetros físicos relacionados con los efectos disipativos que el modelo contempla. En este caso, el análisis se limita a la disipación

de energía por fricción en el fondo, ya que no se registró la presencia de rotura durante la experimentación y, por lo tanto, tampoco se consideran los términos de mezcla turbulenta. Continuando con el trabajo de dimensionamiento, se realiza la elección de las características correspondiente al sistema de generación del oleaje que el modelo requiere. Finalmente, se presenta un análisis sobre la determinación de los tiempos de simulación y la selección de los incrementos temporales que el modelo requiere para establecer un sistema estacionario dentro de las simulaciones numéricas.

7.2.1 Metodología a seguir

El objeto del trabajo de dimensionamiento de los parámetros del modelo numérico es reproducir numéricamente y con la mayor correlación posible los registros de superficie libre utilizados en el trabajo experimental descrito en el capítulo 5.

A tal fin, se realizan una serie de consideraciones, tomando como punto de partida un caso de control previamente establecido, que permite establecer las pautas de diseño a seguir para los demás casos, tanto para las consideraciones geométricas de dominio numérico, como para la asignación de los parámetros físicos relacionados con los procesos de generación del oleaje y las condiciones de contorno más apropiadas.

El caso de control mencionado se trata de una geometría simple con los dos canales portuarios cerrados (denominado caso cero), permitiendo así evaluar las características del oleaje incidente, y observar la generalidad del sistema y patrones de oscilación para establecer los contornos y las dimensiones del dominio numérico. De forma paralela, el caso de control permite proponer los valores de tiempos de simulación con los que el modelo consigue llegar a una situación de estacionariedad y eficiencia computacional.

Por último, es importante mencionar que el proceso previo de dimensionamiento que se presenta en este apartado, involucra múltiples trabajos de ajuste y ensayos sistemáticos de variadas alternativas físicas y geométricas de los casos a simular, con la dificultad de que las variables involucradas se interrelacionan y retro-alimentan constantemente, lo que dificulta el proceso y hace que los trabajos de calibración expuestos a continuación, no guarden un orden determinado.

7.2.2 Diseño de los casos a modelar

Al igual que para el diseño de las campañas de simulación y medición de oleaje en instalaciones de laboratorio se requiere una serie de consideraciones previas para poder establecer los parámetros físicos de diseño, la construcción del modelo, los equipos de medida a utilizar, los tiempos de simulación y el planeamiento óptimo del trabajo, las simulaciones numéricas del oleaje requieren una serie de pasos previos ordenados que permitan evaluar las variables y parámetros relacionados con el diseño de los casos a modelar. Entre estos, se encuentra el diseño del dominio computacional y contornos (zona de propagación y zona de absorción); las características dimensionales del mallado, el dimensionamiento de la zona de generación, el establecimiento de los puntos de medida adecuados o testigos de la simulación y la calibración de algunos parámetros como, por ejemplo, la fricción.

En este apartado se presentan una serie de pruebas numéricas dimensionadas con un caso de control seleccionado de entre la serie de casos experimentales mostrados en el capítulo correspondiente. A partir de dicha prueba inicial, se seleccionan los puntos de registro de series temporales numéricas dentro del dominio numérico; se elabora una malla de discretización que conduzca a los mejores resultados numéricos; se establece la posición y dimensiones de la zona de generación del oleaje; se obtiene el incremento de tiempo óptimo intentando minimizar los tiempos de ejecución; se hace un análisis de la estabilización temporal de las simulaciones, y finalmente se estudia el correcto funcionamiento de la esponja de absorción que tiene como misión fundamental garantizar que se produce “la radiación” del hacia el exterior del dominio. La calibración se realiza con un único parámetro, el coeficiente de fricción. Esta configuración final se mantiene para el resto de casos simulados.

La figura 7.1 proporciona un esquema que ilustra los distintos elementos que conforman las simulaciones numéricas que el modelo MANOLO utiliza en general, y en particular las necesarias para la simulación de los casos de laboratorio considerados en esta investigación. Se puede observar que el dominio general se subdivide en una zona de generación del oleaje, una zona de absorción de la energía radiada fuera del dominio, una zona de regularización del flujo y la zona de estudio en cuestión o zona portuaria,

en la que se disponen las diferentes configuraciones portuarias consideradas en las campañas de laboratorio.

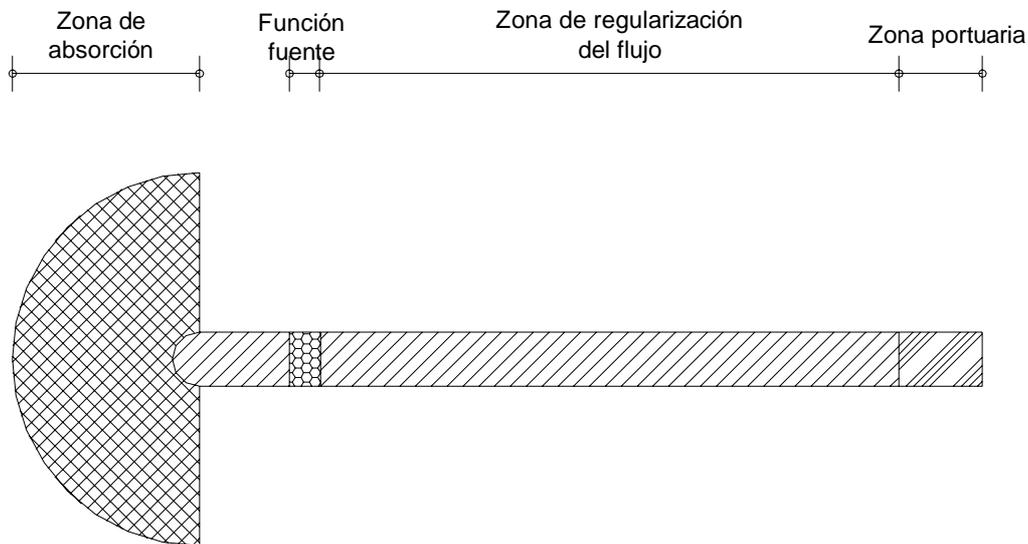


Figura 7.1 Esquema general del dominio computacional y los elementos que lo conforman.

A continuación, se procede a analizar de manera independiente el dimensionamiento y caracterización de los siguientes elementos fundamentales para la elaboración del análisis numérico de los casos considerados:

- a) Dimensiones del dominio computacional y malla en elementos finitos
- b) Generación del oleaje
- c) Dimensionamiento de la zona de absorción de energía (radiación al exterior)
- d) Calibración del factor de fricción en el fondo

a) Dimensiones del dominio computacional y malla en elementos finitos

Las dimensiones del dominio computacional, para todas las simulaciones numéricas de las experimentaciones de laboratorio, parten de una misma base geométrica, intentando respetar las dimensiones físicas del canal de oleaje real: longitud, anchura, distancia a la pala generadora (frente de generación) y al inicio de la zona portuaria.

La anchura y longitud total del canal numérico se fijan en $w=2$ m, y $l_n=47$ m respectivamente, con una distancia desde la zona de generación hasta el inicio de la zona portuaria de 44 m siguiendo la distancia real medida en laboratorio, lo cual implica que la distancia de la zona de generación al inicio de la corona de absorción de oleaje es de 3 m.

La distancia desde la zona de generación hasta el inicio de la corona de absorción de oleaje sumado con la longitud de dicha zona, deben de conducir a un comportamiento en cuanto a la absorción del oleaje se refiere equivalente al que realiza el sistema AWACS©.

La malla en elementos finitos triangulares suele presentar variadas combinaciones en sus formas y características geométricas, dependiendo de las técnicas de subdivisión de elementos y de la elección de la dimensión representativa del tamaño de los mismos, GIOG (2001).

La experiencia nos indica que se debe de prestar especial atención a la hora de diseñar una malla adaptativa que pueda generarse con varios grados de libertad como la que utiliza el modelo MANOLO, debido a que en cada zona de estudio hay una relación directa entre la calidad de la malla preestablecida y la del flujo resultante.

En la literatura, diversos autores recomiendan que la ola generada dentro del dominio, quede definida por un rango de al menos 15 a 30 elementos por longitud de onda Woo & Liu (2004a), para asegurar así la adecuada representación física del oleaje.

Particularmente, para las simulaciones que nos competen, tenemos que al periodo de onda monocromática de $T=2$ s, con una profundidad en todo el dominio $h=0.5$ m, constantes para todos los casos simulados en el laboratorio, le corresponde una longitud de onda $L=4.056$ m de acuerdo con la relación de dispersión lineal. De esta forma, la elección del tamaño de los elementos dentro de malla computacional, depende exclusivamente de la longitud de onda correspondiente a la frecuencia incidente principal. Sin embargo, como se podrá ver mas adelante, la aparición de armónicos de orden superior inherentes a los procesos de transformación del oleaje, hace que la selección del tamaño de malla no deba realizarse para el periodo objetivo, sino para

frecuencias superiores y por ende, longitudes de onda menores. Siempre teniendo en cuenta las posibles limitaciones derivadas del tamaño final de la malla y de los tiempos de computación.

Tomando los valores que recomienda la literatura, se decide comparar y observar las características del mallado a utilizar para dos mallas con 15 y 30 nodos por longitud de onda, respectivamente. Ambas se diseñan respetando las dimensiones geométricas del caso de laboratorio con las dos bocanas portuarias cerradas y una profundidad constante $h=0.5$ m.

La figura 7.2 muestra la comparación de las dos mallas triangulares no estructuradas para las dos discretizaciones consideradas y sus diferencias en la zona de generación del oleaje.

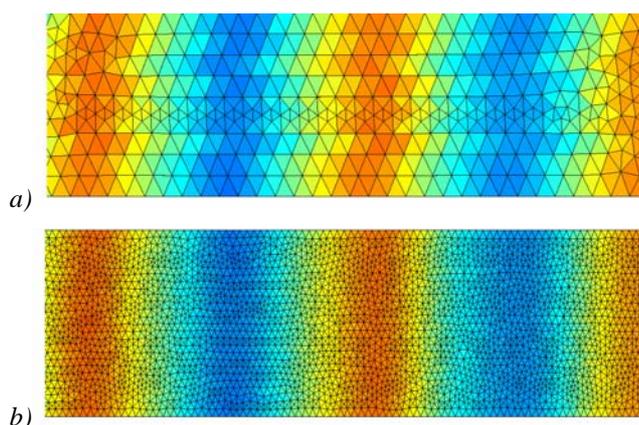


Figura 7.2 Ejemplo de dos MEFs con diferente precisión geométrica $t=20s$;

- a) Malla para 15 nodos por longitud de onda,
- b) Malla para 30 nodos por longitud de onda.

La figura 7.2 pone de manifiesto las posibles diferencias que se pueden encontrar en la propagación del oleaje dentro del dominio computacional al utilizar diferentes tamaños de malla. En la primera malla (diseñada con 15 nodos por longitud de onda), se observa que los frentes del oleaje presentan cierta asimetría, debido a que únicamente aproximadamente 10 elementos la definen transversalmente, mostrando leves variaciones de la superficie libre para los cortes transversales.

Si se observa la segunda malla (30 nodos por longitud de onda), se tiene que los frentes del oleaje cambian de forma gradual y que éstos conservan los mismos valores de superficie libre transversalmente, concluyendo así que el uso de la malla más densa proporciona mayor calidad en la geometría del oleaje generado y, por lo tanto, en las simulaciones se utilizará dicho valor para el mallado.

Las observaciones antes mostradas solamente ayudan a visualizar el desarrollo espacial del oleaje generado, sin tener en cuenta la calidad en la reproducción de los procesos de transformación del mismo, o las posibles interacciones entre armónicos debidas a los procesos de transformación. Por lo tanto, se propone realizar una simulación numérica que se alimente de un oleaje incidente que incluya a priori las descomposiciones energéticas observadas en el análisis de los resultados de los experimentos presentados en capítulos anteriores. En dichos experimentos se observó que el total de la energía incidente se descompone en tres frecuencias: $f_1=0.5$ Hz, $f_2=1$ Hz y $f_3=2$ Hz, correspondientes al primer, segundo y tercer armónico, respectivamente, lo cual corresponde a su vez a los siguiente números de onda adimensionales de $h/L_1=0.1232$, $h/L_2=0.3304$ y $h/L_3=1.2809$.

Como se ha dicho anteriormente, el rango de validez de la versión actual del modelo MANOLO es $0 < h/L_0 < 0.5$, según lo establecido en Nwogu (1993). Para el caso particular de los ensayos de laboratorio llevados a cabo en esta Tesis, el periodo límite de aplicación para $h=0.5$ sería de $T_{lim}=0.8018$ s o lo que es lo mismo una frecuencia máxima de $f_{max}=1.2471$ Hz, donde el tercer armónico antes mencionado presentaría errores del 0.17% para la celeridad de fase de la onda y del 0.74% para la celeridad de grupo.

Por tanto, para revisar las propiedades físicas y la calidad del oleaje que se propaga numéricamente dentro de las dos mallas propuestas, así como la posible transferencia frecuencial de energía hacia armónicos de orden superior, se propone una simulación considerando un oleaje unidireccional compuesto por las tres frecuencias mencionadas interactuando linealmente, todas con el mismo valor de altura incidente de $H=0.025$ m, asegurando así que las simulaciones posteriores estarán bien representadas por la malla computacional en los casos de existir transferencias de energía hacia los armónicos de orden superior.

Las figuras 7.3 a 7.5 muestran la comparación de la superficie libre numérica obtenida para el oleaje tri-cromático propagándose sobre una malla de 15 nodos por longitud de onda (azul) y el mismo oleaje sobre una malla de 30 nodos por longitud de onda (rojo), para el intervalo temporal de 120s a 180s.

Se observa que la primera malla no tiene la resolución necesaria para simular los armónicos de orden superior adecuadamente en ninguna posición, dando lugar a que la superficie libre adquiriera la forma correspondiente únicamente al armónico principal como si se tratase de un oleaje monocromático. Sin embargo, en la segunda malla se verifica la existencia de la interacción frecuencial entre componentes, consiguiéndose una superficie propia de una interacción entre las tres frecuencias.

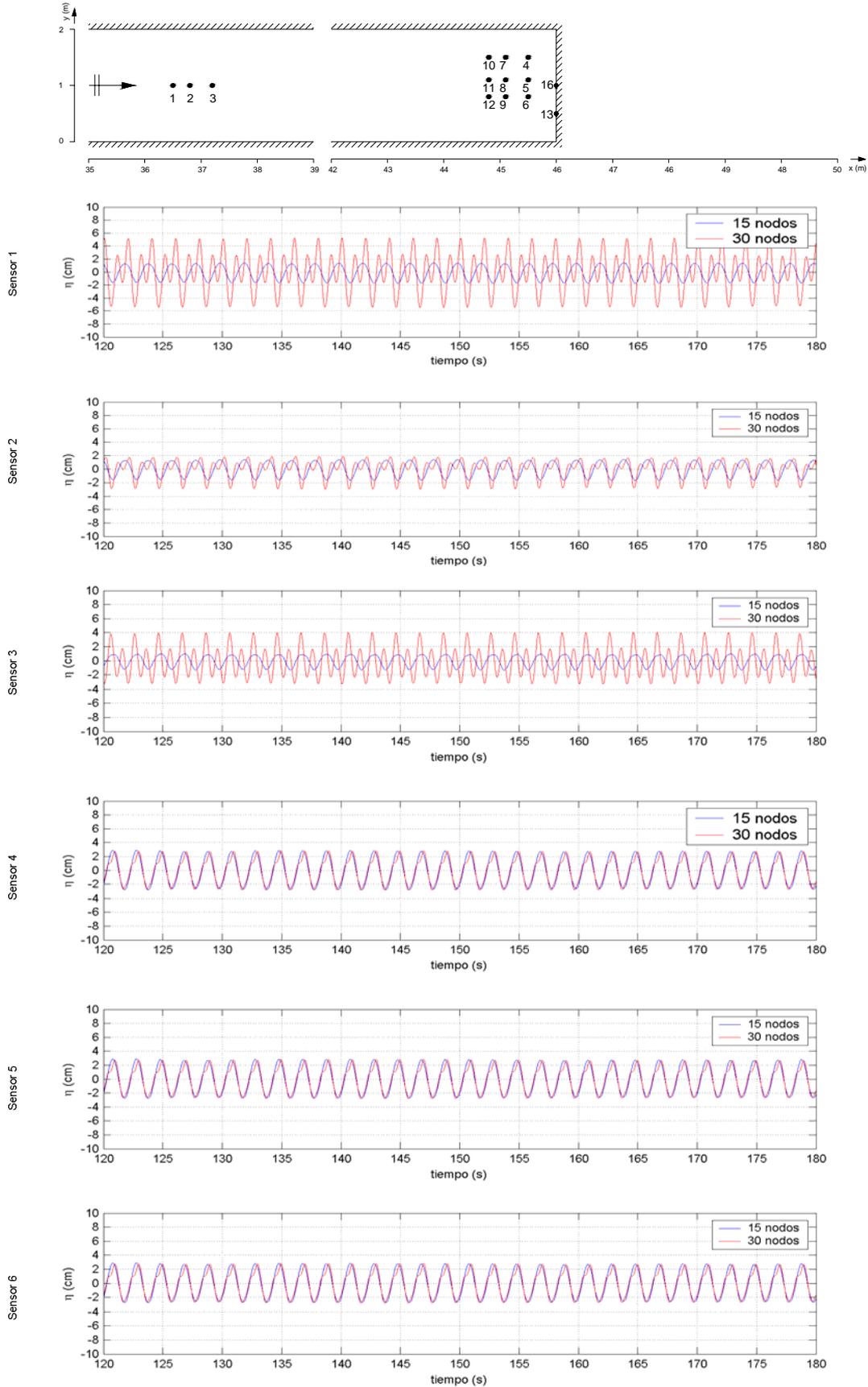


figura 7.3 Comparación de superficie libre numérico para el caso de utilizar la malla de 15 nodos por longitud de onda (azul) y utilizando 30 nodos por longitud de onda (rojo). Puntos 1 a 6.

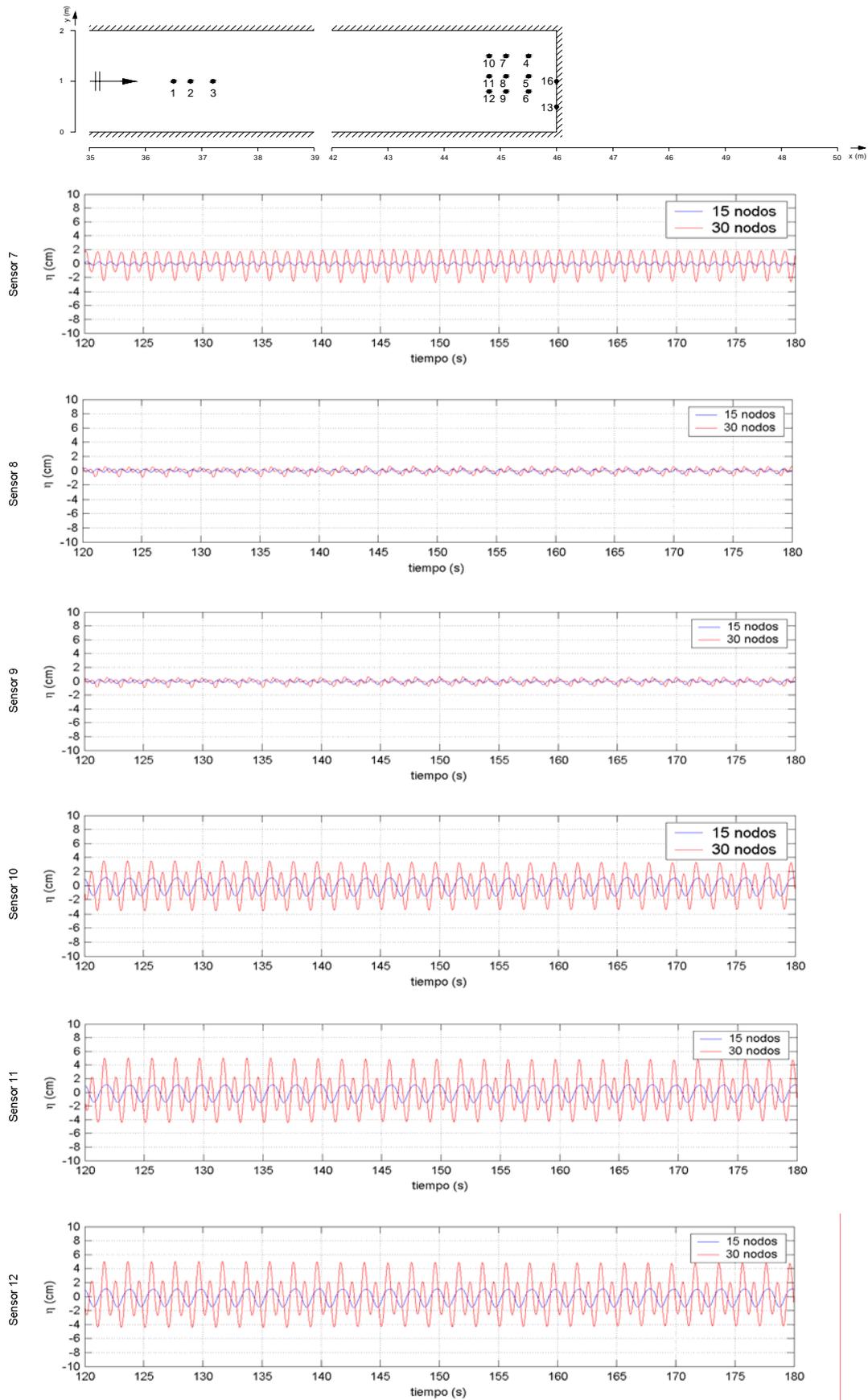


figura 7.4 Comparación de superficie libre numérico para el caso de utilizar la malla de 15 nodos por longitud de onda (azul) y utilizando 30 nodos por longitud de onda (rojo). Puntos 7 a 12.

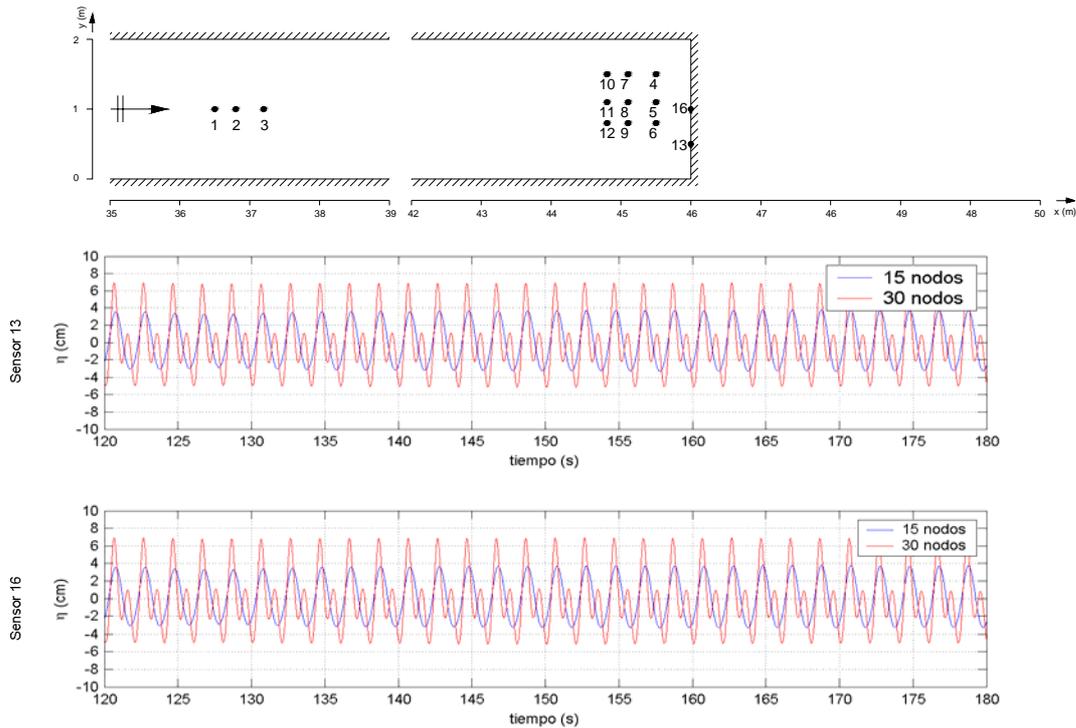


figura 7.5 Comparación de superficie libre numérico para el caso de utilizar la malla de 15 nodos por longitud de onda (azul) y utilizando 30 nodos por longitud de onda (rojo). Puntos 13 y 16.

La figura 7.6 muestra algunos de los espectros de amplitud correspondientes a los registros de superficie mostrados anteriormente, observándose claramente que la malla diseñada con 15 nodos por longitud de onda solo es capaz de representar adecuadamente el primer armónico del tren de oleaje compuesto por tres frecuencias principales. Como se puede ver, la información relativa a la distribución de la energía en los diferentes armónicos puede llegar a ser completamente errónea.

Por tanto, una adecuada representación de la superficie libre y de su transformación dentro del dominio, depende de manera importante del diseño de una malla numérica con una discretización suficiente como para lograr representar todas las frecuencias involucradas en el flujo, tanto para la frecuencia principal del oleaje incidente si se trata de un oleaje monocromático, como para el periodo de pico si es que el sistema es forzado por un oleaje espectral. En ambos casos se deberá considerar las posibles frecuencias en las que el oleaje pueda transformarse.

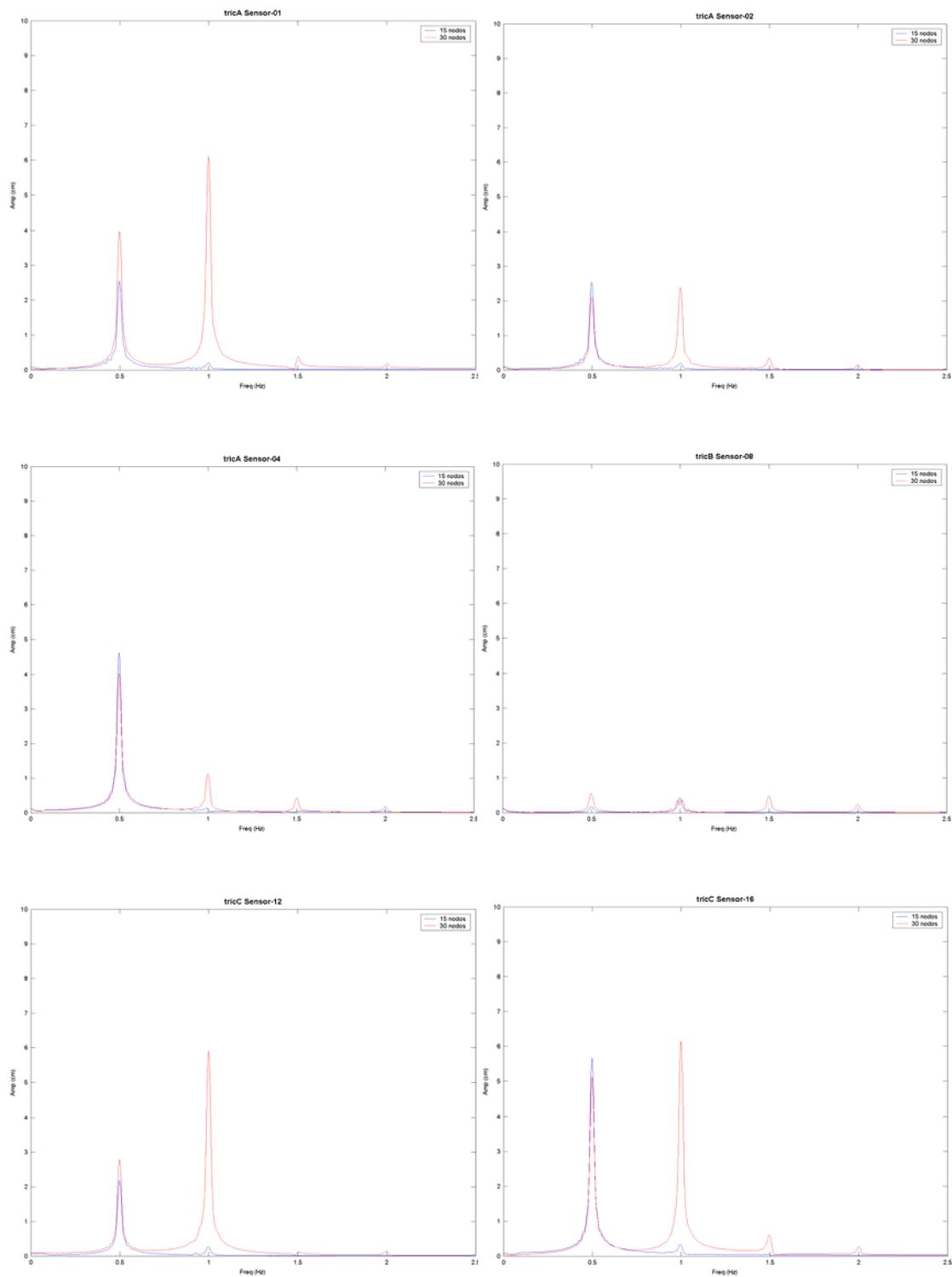


Figura 7.6 Comparaciones de los espectros de amplitud obtenidos para el caso de utilizar una malla con 15 nodos por longitud de onda (azul) y utilizar 30 nodos por longitud de onda (rojo), para 6 puntos dentro del domino (1, 2, 4, 8, 12, y 16).

b) Generación del oleaje

El trabajo de preparación de las simulaciones numéricas de los casos de laboratorio, no solo se limita a establecer las condiciones espaciales del dominio computacional y de las dimensiones del mallado para buscar la adecuada representación del oleaje numérico. Además, es necesario conseguir una adecuada generación de éste último intentando reproducir fielmente las condiciones de generación observadas en el laboratorio y, particularmente, el comportamiento mecánico de la pala de generación de oleaje en el laboratorio.

Como se explicó en apartados anteriores, el modelo MANOLO utiliza una función de generación basado en una función fuente localizada dentro del dominio computacional, desde la cual se añade o sustrae una cierta cantidad de masa a lo largo del tiempo. Dicha masa es equivalente a una amplitud de onda incidente a través de una función de transferencia como lo explica Wei *et al.* (1999).

La utilización de una fuente de generación de oleaje implica la implementación de una función de absorción del oleaje que se irradia hacia el exterior del dominio. Esta función de absorción debe diseñarse en función del oleaje generado para garantizar su radiación hacia el exterior del dominio. Para ello se diseña un área de disipación denominada corona de absorción, que dependiendo de las condiciones del prototipo, puede asumir el papel de zona exterior del dominio hacia mar abierto, o bien tratar de simular el comportamiento del mecanismo de absorción del oleaje implementado en una pala de generación en laboratorio, (por ejemplo, el sistema AWACS).

La zona de absorción del oleaje, sus características y diseño se explicarán en el siguiente apartado.

Una norma de buena práctica en el laboratorio establece que, con el fin de conseguir la generación de un sistema estable de ondas progresivas, es necesario un mínimo de tres periodos hasta alcanzar la amplitud máxima del tren de ondas. Dicho de otra manera, el tren de ondas no se encuentra totalmente establecido hasta que no se han generado la menos tres períodos.

Esta condición de generación, además de ser aplicable al laboratorio, se puede extrapolar a las condiciones de generación numéricas del modelo MANOLO, imponiendo un “calentamiento” de la altura de onda paulatino dentro de los tres primeros periodos.

La anchura de la zona de generación numérica se ha establecido en 0.76 m; valor obtenido de las recomendaciones propuestas inicialmente por Wei *et al.* (1999), para la generación numérica de una onda monocromática.

La figura 7.7 muestra, para diversos casos simulados numéricamente, registros temporales de superficie libre en el intervalo temporal de 0 s a 60 s.

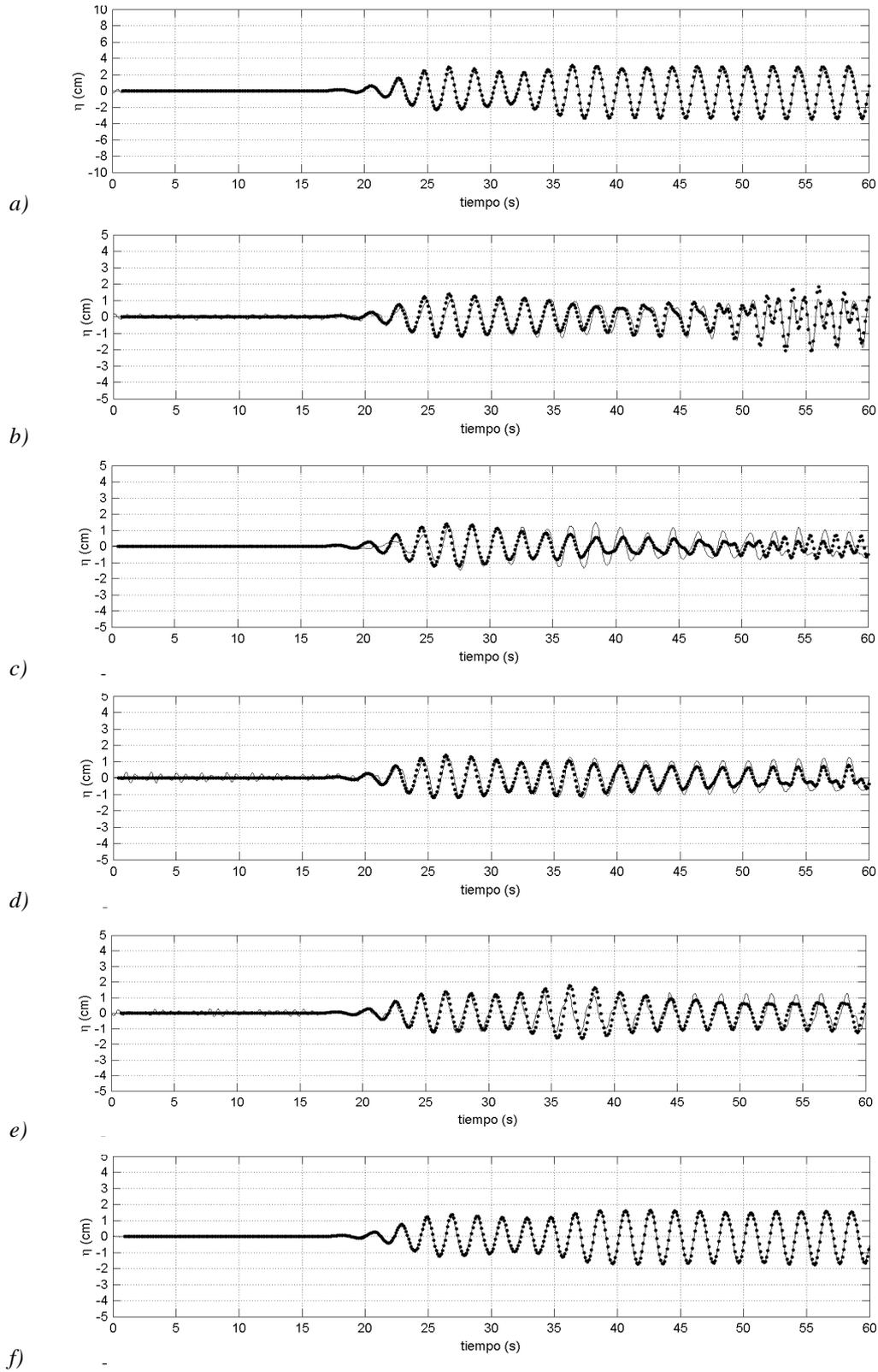


Figura 7.7 Registros temporales de superficie libre de la generación del oleaje, numérico (puntos), y experimental (línea), para diferentes casos simulados y para el sensor 1 (zona de incidencia).

a) 0003, b) 0102, c) 0302, d) 0501, e) 0902, y f) 1702

Los resultados obtenidos para todos los casos indican que la fuente numérica de generación se comporta de manera equivalente a la pala de generación en el laboratorio. Las tres primeras olas comienzan a crecer de forma paulatina hasta estabilizarse aproximadamente en el $t=30s$. Posteriormente, el registro adopta la forma correspondiente a la ola incidente interactuando con la onda reflejada, presentando en algunos casos una sobre-amplificación de aproximadamente 1.5 veces la amplitud incidente.

Para los casos que presentan transformaciones del oleaje más acusadas (casos resonantes y puertos acoplados, figura 7.7, b) y c)), se observa que aproximadamente a los 50 s el oleaje registrado comienza a adoptar perfiles compuestos por la suma del armónico principal y de los armónicos de orden superior derivados de dichas transformaciones del oleaje por efecto de los contornos. Es decir, el tiempo necesario para la estabilización es mayor debido a que es necesario esperar a que el proceso resonante se haya establecido completamente.

c) Dimensionamiento de la zona de absorción de energía (radiación al exterior)

De forma simultánea al diseño del dominio numérico, en el que se realiza la elección del tamaño de malla del dominio computacional, se debe emprender un análisis sobre las características de la zona de absorción de energía que se irradia hacia el exterior, también denominada corona absorbente.

El oleaje, en una situación real, interactúa con los contornos y se mueve a lo largo del dominio, sufriendo transformaciones físicas que lo reflejan, difractan, refractan e irradian en múltiples direcciones, busca salida hacia el exterior del dominio.

Como se pudo ver en capítulos anteriores, para simular los efectos descritos del oleaje que “sale” del dominio numérico, se emplea la técnica de “enfriamiento” Newtoniano que consiste en aplicar una ponderación decreciente directamente a los valores de superficie libre de la onda que se propaga a través de la zona de absorción, con una función exponencial que va desde 1 hasta 0 en una distancia fija, que se corresponde con la longitud de la corona de absorción.

Las dimensiones de la corona de absorción se definen siguiendo la técnica de Israeli & Orszag (1981), que a su vez retoma Kirby *et al.* (1998) con la recomendación de que la longitud de la zona de absorción de oleaje debe de ser de 2 a 3 veces la longitud de onda incidente para oleaje monocromático.

Con base en esto, la longitud de la corona de absorción para los casos a simular se toma de 3 veces la longitud de onda incidente según lo recomendado en Kirby *et al.* (1998), $l_c=12\text{m}$ con una definición de 5 nodos por longitud de onda. Es decir, la discretización en la corona puede ser de una resolución muy inferior a la necesaria en el resto del dominio con un ahorro computacional evidente. Esto es debido a que no es necesario resolver la superficie libre, sino garantizar la disipación de la onda que sale del dominio. La figura 7.8 representa el perfil longitudinal del oleaje en la zona de absorción, encontrándose un excelente funcionamiento de la misma a la hora de disipar el oleaje que se mueve hacia el exterior del dominio computacional.

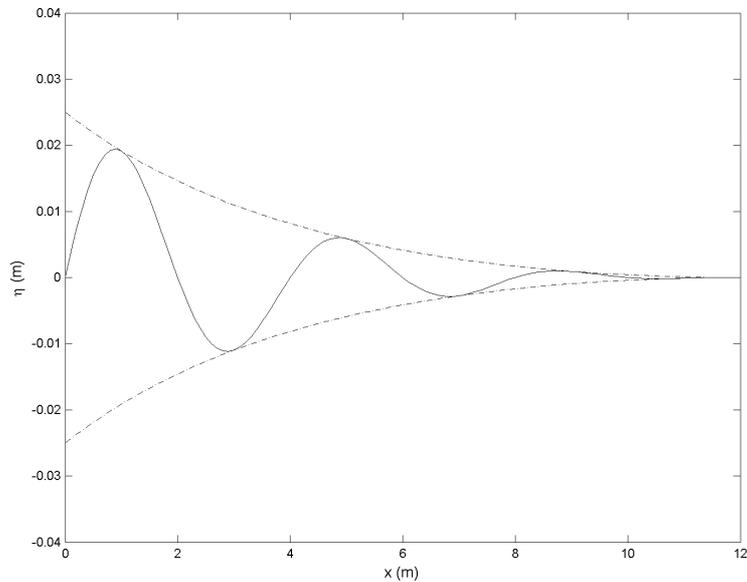


Figura 7.8 Decaimiento de la superficie libre a lo largo de la corona de absorción de energía hacia el exterior, $T=2\text{s}$, $h=0.025\text{m}$. Superficie libre (línea continua), función de “enfriamiento” Newtoniano (línea y puntos).

d) Calibración del factor de fricción en el fondo

En el apartado de descripción de las ecuaciones que utiliza el modelo MANOLO, se comenta que se contemplan tres tipos de factores físicos para simular las pérdidas de energía: la rotura, la mezcla turbulenta y la fricción por fondo.

En las experimentaciones en laboratorio, tanto los casos no resonantes como aquellos que presentaron características sobre-amplificadas en la superficie dentro de los canales portuarios, debido a efectos resonantes, no tuvieron influencia alguna de procesos de rotura de la onda y, por lo tanto, tampoco de los efectos turbulentos derivados de dichos procesos.

Para las simulaciones numéricas mostradas en este capítulo, se ha contemplado únicamente los efectos de la disipación por fricción, a través de la calibración del término f_w dentro de la ecuación (6.131, capítulo 6), que afecta directamente a la ecuación de cantidad de movimiento.

La literatura indica que el factor de fricción f_w se puede relacionar directamente con el coeficiente de Chezy a través de la relación.

$$f_w = \frac{g}{C^2}$$

$$C_e = \frac{Rh^{1/6}}{n}$$

donde g corresponde a la constante de aceleración de la gravedad en m/s^2 y C_e corresponde al coeficiente de Chezy que ha sido analizado por diversos autores y relacionado también con el factor n de la ecuación de Manning, para canales abiertos, Chow (1959).

Según Chow (1959), el coeficiente de fricción n para canales abiertos fabricados con láminas de madera con un buen acabado, oscila entre $0.011 < n < 0.012$, lo cual corresponde a un coeficiente de Chezy de entre 69 y 75 y, por lo tanto, un factor de fricción $f_w = 0.014$ a 0.017 .

Tomando el valor de partida de $f_w=0.01$ se realizaron varias pruebas de control para un caso con ambos puertos cerrados (caso 00), un caso resonante (caso 05) y un caso no resonante (caso 04), para las tres alturas de onda incidente consideradas en el laboratorio.

Se ha observado que para las dos alturas de ola menos energéticas $H_1=0.01\text{m}$ y $H_2=0.025\text{m}$, no se registraron cambios apreciables en los valores de la superficie libre en diversos puntos dentro del dominio computacional, tanto para diversos valores del coeficiente ($f_w = 0.01$ a 0.02), como para las simulaciones sin fricción alguna ($f_w=0$).

Sin embargo, para las simulaciones efectuadas con una onda incidente de $H_3=0.05\text{m}$ que corresponde al forzamiento más energético, se registraron importantes efectos en la utilización del factor de fricción, sobre todo en aquellos casos en donde se tuvieron episodios de resonancia portuaria, debido a que la onda sobre-amplificada dentro del puerto se ve afectada por los efectos de fricción del fondo.

Además, es necesario hacer constar que los resultados observados son consecuencia de que la fricción afecta directamente a los valores de velocidad bidimensional, modificados de manera importante durante los episodios resonantes observados, y que a su vez la fricción esté directamente relacionada con el cuadrado de la velocidad y, por tanto, amplitud de la onda correspondiente.

En la bocana se han observado importantes efectos turbulentos durante los episodios resonantes, consecuencia de los fuertes efectos de chorro, vorticidad tridimensional, y gradientes de velocidades. Este conjunto de efectos implica tener efectos de disipación importantes en la bocana, que numéricamente el modelo debe de gestionar a través de los otros mecanismos de disipación implementados en el modelo, fundamentalmente, la fricción.

En las figuras 7.9 a 7.11 se muestra los registros de superficie libre en tres puntos diferentes dentro del dominio, para el caso sin fricción y el caso con un coeficiente de fricción $f_w=0.012$, valor que fue asignado para todas las simulaciones posteriores.

Como ya se ha dicho, la mayor sensibilidad a la fricción se ha encontrado para los casos que con resonancia.

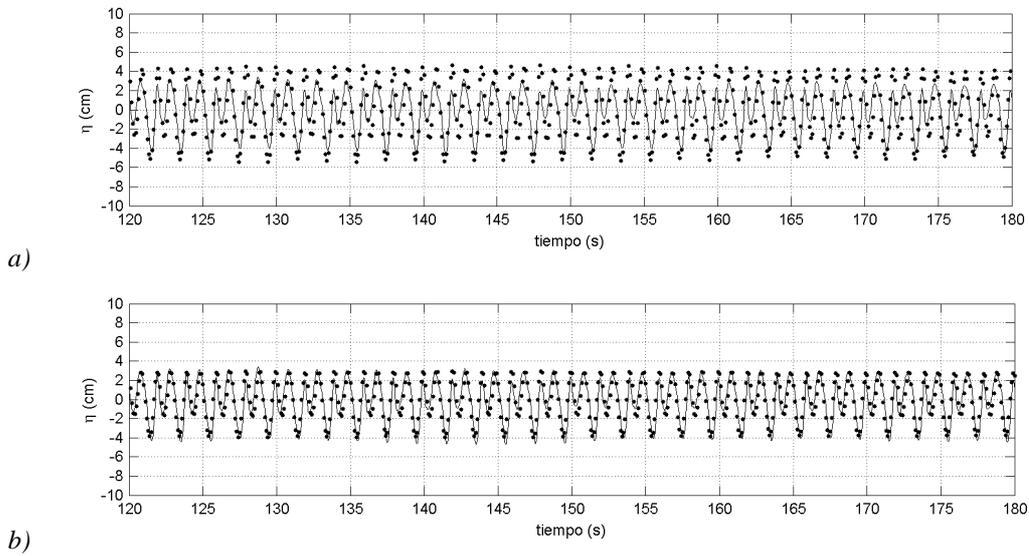


Figura 7.9 Registro de superficie libre para el sensor 1 (zona de incidencia), caso 0101 ($T=2s$, $a=0.05m$). a) Sin fricción en el fondo, b) con fricción en el fondo $f_w=0.012$. Resultados numéricos (puntos), serie experimental (línea).

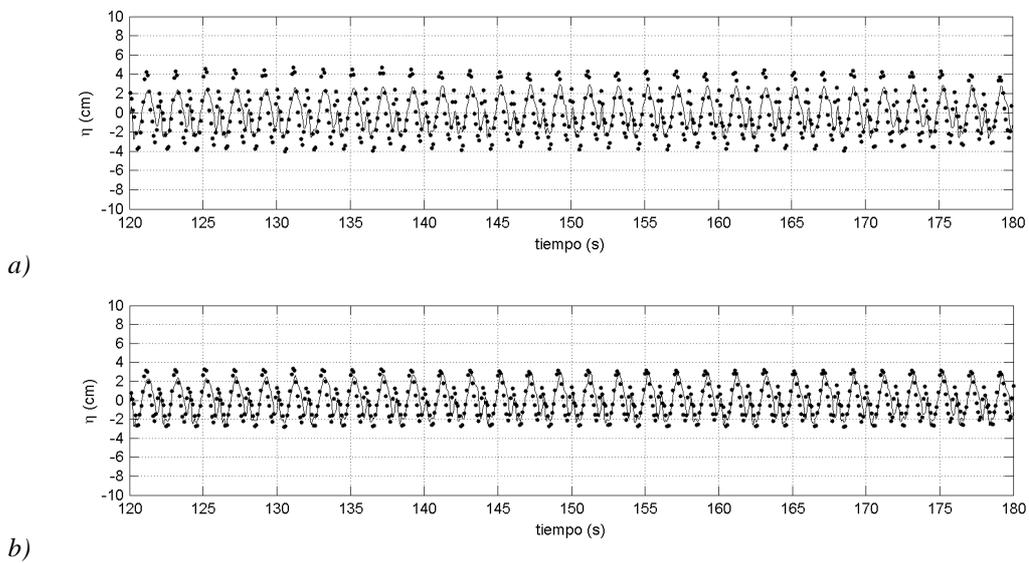


Figura 7.10 Registro de superficie libre para el sensor 7 (zona de radiación), caso 0101 ($T=2s$, $a=0.05m$). a) Sin fricción en el fondo, b) con fricción en el fondo $f_w=0.012$. Resultados numéricos (puntos), serie experimental (línea).

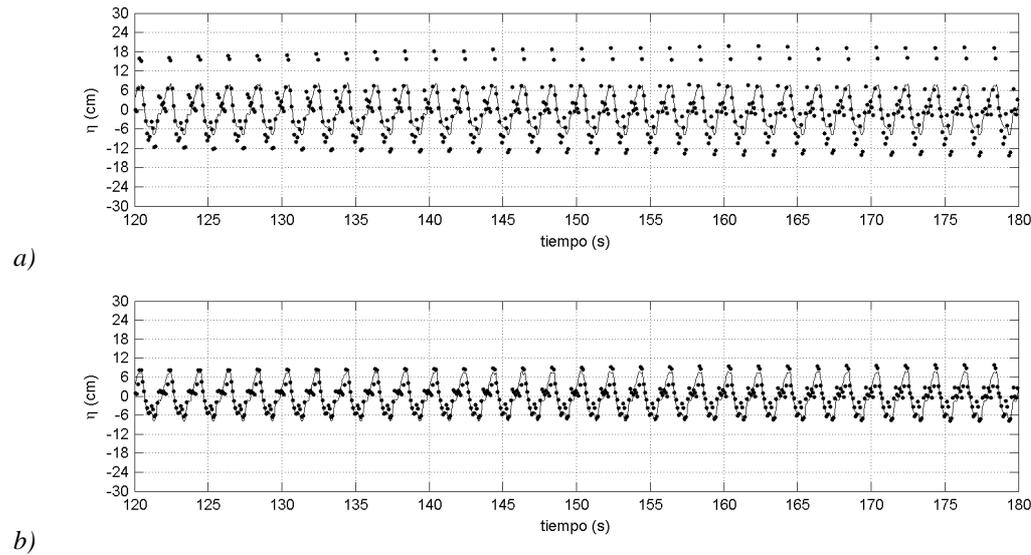


Figura 7.11 Registro de superficie libre para el sensor 17 (zona de radiación), caso 0101 ($T=2s$, $a=0.05m$). a) Sin fricción en el fondo, b) con fricción en el fondo $f_w=0.012$. Resultados numéricos (puntos), serie experimental (línea).

En las figuras anteriores, 7.9 a 7.11, se observa el papel que juega la fricción en la superficie libre de la onda monocromática simulada numéricamente, y la importancia que tiene la elección de un correcto valor del factor de fricción f_w , para conseguir el mejor ajuste, especialmente en la amplitud.

La sensibilidad del factor de fricción dentro del modelo numérico MANOLO, varía en función de las características del flujo a modelar, y en particular al grado de no linealidad que el flujo presente, y las posibles transformaciones que éste sufra a lo largo del tiempo.

Para el caso de la modelación del fenómeno de resonancia portuaria, una adecuada elección del factor de fricción es determinante para poder evaluar correctamente las magnitudes de la sobre-elevación que sufre el flujo dentro de las dársenas portuarias, permitiendo así conocer no solo aquellos periodos de respuesta resonante del cuerpo de agua semi-encerrado, sino las magnitudes exactas de las amplificaciones y la evolución temporal, contando así con información importante para el diseño de las obras portuarias.

Finalmente, se hace mención de que la elección de un adecuado coeficiente de fricción a la hora de diseñar las simulaciones numéricas del modelo MANOLO, es una tarea relativamente fácil ya que la mecánica de fluidos ofrece un importante compendio de valores de los factores de fricción que guardan íntima relación con contornos físicos reales existentes en la naturaleza, o aquellos artificiales construidos en laboratorio.

7.2.3 Resumen del trabajo de calibración

Una vez finalizado el análisis anterior, las simulaciones se han realizado siguiendo los criterios anteriormente propuestos, con una malla en elementos finitos triangulares con una discretización de 30 nodos por longitud de onda para la onda incidente, sobre un fondo constante de $h=0.5\text{m}$, y para diversas geometrías de los canales portuarios.

Las características de la malla en elementos finitos para las 25 geometrías simuladas se muestra, a continuación, en la tabla 7.1

Caso	Puerto 1 (m)	Puerto 2 (m)	nodos	elementos
00	0	0	22193	43332
01	1	0	22281	43488
02	2	0	22296	43498
03	3	0	22336	43558
04	4	0	22378	43622
05	5	0	22452	43750
06	5	1.25	22460	43742
07	5	2.5	22552	43900
08	5	3.75	22585	43942
09	5	5	22662	44070
10	4	1	22419	43684
11	4	2	22466	43758
12	4	3	22510	43826
13	4	4	22554	43894
14	3	0.75	22404	43680
15	3	1.5	22414	43684
16	3	2.25	22458	43758
17	3	3	22484	43794
18	2	0.5	22328	43552
19	2	1	22347	43580
20	2	1.5	22378	43632
21	2	2	22397	43660
22	1	0.25	22268	43458
23	1	0.5	22284	43484
24	1	0.75	22308	43528
25	1	1	22328	43562

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

La figura 7.12 muestra un ejemplo de una malla adaptativa en elementos finitos triangulares, utilizada en las simulaciones numéricas para el caso 25.

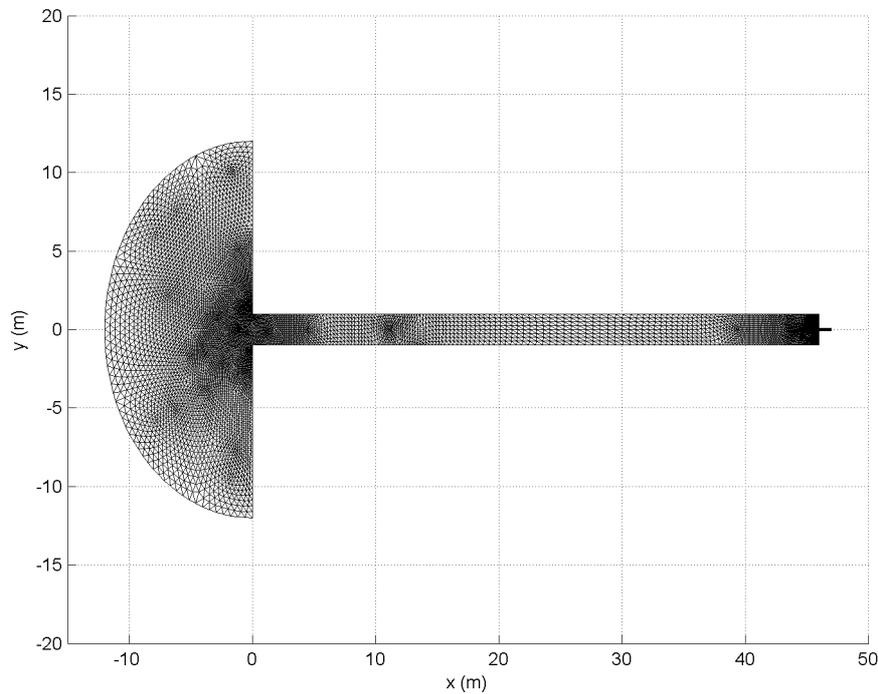


Figura 7.12 Malla en elementos finitos triangulares diseñada para las simulaciones con la geometría 01.

Todas las simulaciones han sido diseñadas para un tiempo total de 300s y un intervalo numérico de simulación (paso de tiempo) de $\Delta t = 0.005s$, siguiendo las recomendaciones de estabilidad numérica que impone el número de Courant.

La zona de radiación y absorción de energía hacia el exterior, ha sido establecida diseñada, tras un proceso iterativo que converge al encontrar la longitud óptima de absorción de las ondas que se mueven hacia el exterior del dominio, figura 7.12.

La zona de generación se ha situado para todos los casos en la recta $x=3m$ del dominio computacional respetando así la longitud real medida desde la pala de generación de oleaje hasta el inicio de las bocanas de los puertos rectangulares en laboratorio.

7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS CON LAS SERIES EXPERIMENTALES DE DATOS

7.3.1 Introducción

En el apartado anterior, se ha presentado una metodología que engloba la mayor parte de las recomendaciones necesarias para preparar las simulaciones numéricas de los casos experimentales mostrados en el capítulo 5.

Estas simulaciones constituirán el núcleo principal de la validación del modelo numérico y mostrarán la capacidad o no del modelo para analizar problemas de resonancia portuaria teniendo en cuenta los elementos relativos a la generación, transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico varias veces citados a lo largo de esta Tesis. Una vez validado el modelo, se podrán proponer nuevas configuraciones numéricas para ahondar en el estudio del fenómeno de resonancia en puertos pero ya en la escala real.

Como se recordará, las configuraciones portuarias ensayadas en el laboratorio incluyen casos sin resonancia, con resonancia lineal, con resonancia no lineal. Las anteriores se han considerado para puertos individuales o con dos puertos para analizar los posibles acoplamientos y su incidencia sobre el sistema resonante. Dado que se pretende que la validación se lo más completa posible, se han considerado varios casos que se consideran representativos de los diferentes fenómenos relevantes.

El orden en el que se van a ir mostrando las comparaciones de los resultados numéricos con los datos experimentales es el siguiente:

- a) Comparaciones para los casos experimentales de un puerto trabajando en solitario, con condiciones no resonantes y resonantes.
- b) Comparaciones para los casos experimentales de un sistema acoplado portuario (dos puertos), para un caso de dos puertos no resonantes, un caso de dos puertos

resonantes y un caso mixto de un puerto no resonante y el segundo puerto resonante.

En todos los casos simulados, se presenta, en los 18 puntos de medida, según se recoge en el capítulo 5, una comparación de la serie temporal medida y calculada en el intervalo de 120 a 180 segundos, en el que el sistema se considera totalmente estabilizado. Además, se muestra la comparación entre los espectros experimentales y numéricos obtenidos a partir de la señal en los citados puntos y en el mismo intervalo de tiempo.

Para algunos casos concretos en los que se produce resonancia se presentan en algunos puntos interiores de los canales, los espectros wavelet correspondientes al periodo de tiempo simulado, con el fin de observar como se produce la transferencia de energía de unas frecuencias a otras, en el tiempo.

Asimismo, se muestran las comparaciones de la superficie libre en todo el canal en un instante determinado. Este tipo de representación muestra muy claramente las diferencias entre procesos de resonancia lineal y no lineal, así como los casos en los que se produce acoplamiento.

Dado que el modelo nos ofrece la posibilidad de contar con información más detallada, se muestra información relativa al campo de velocidades para algunos casos específicos.

Finalmente, se hace constar una vez más que los casos seleccionados y que se exponen a continuación son tan solo una muestra representativa del total de casos simulados que por su extensión no pueden recogerse en su totalidad en esta Tesis.

7.3.2 Un solo puerto abierto

a) Sin resonancia

En las figuras 7.13 a 7.15 se presenta los resultados comparativos correspondientes a la configuración portuaria 0202 (un puerto de 2 m de longitud, no resonante), para los 18 puntos de medición existentes. Los gráficos muestran conjuntamente los registros de superficie libre medidos y numéricos en el intervalo de tiempo entre 120 y 180 segundos.

Se observa que, en general, el modelo reproduce muy bien las series temporales de superficie libre para el caso de un solo puerto sin resonancia, además mostrar adecuadamente las posiciones de nodos y antinodos registradas en todo el dominio. En todo el registro, el modelo logra describir adecuadamente la superficie libre en la zona de incidencia en los sensores de 1 a 3, produciéndose las máximas discrepancias con respecto a los datos experimentales para este último punto, debido posiblemente a ligeras variaciones en la posición de dicho sensor en el laboratorio para cada simulación realizada.

La línea de sensores 4 a 6, muestra una reflexión prácticamente perfecta, y sin aparente influencia del puerto, como se desprende de que la altura de ola dobla la altura incidente. Los sensores restantes de la zona de radiación 7 a 9 y 10 a 12, reproducen un punto cercano a un cuasi-nodo y un punto intermedio entre un cuasi-nodo y un cuasi-antinodo respectivamente, mostrando fuerte influencia de un segundo armónico en la serie temporal.

Los sensores situados en la zona portuaria, 16 a 18, muestran que la onda incidente que ahora cuenta con el doble de amplitud debido al efecto de la reflexión, penetra perfectamente en el canal, presentando un nodo en el punto medio, y dos antinodos en la bocana y al final del canal portuario. La correlación con los datos experimentales es prácticamente perfecta.

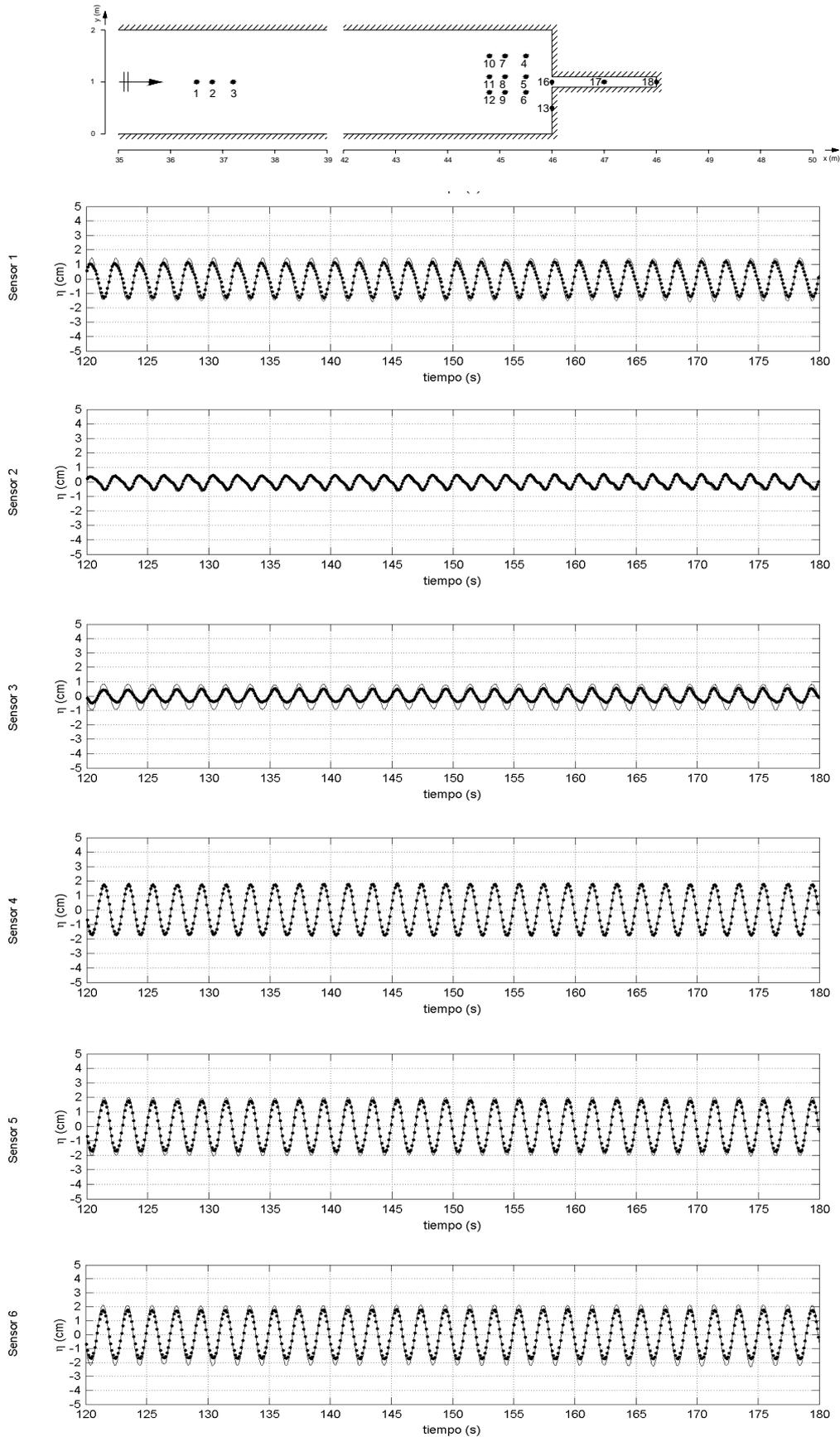


Figura 7.13 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0202, $H=0.025\text{m}$, $T=2\text{s}$, $h=0.5\text{m}$; $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6.

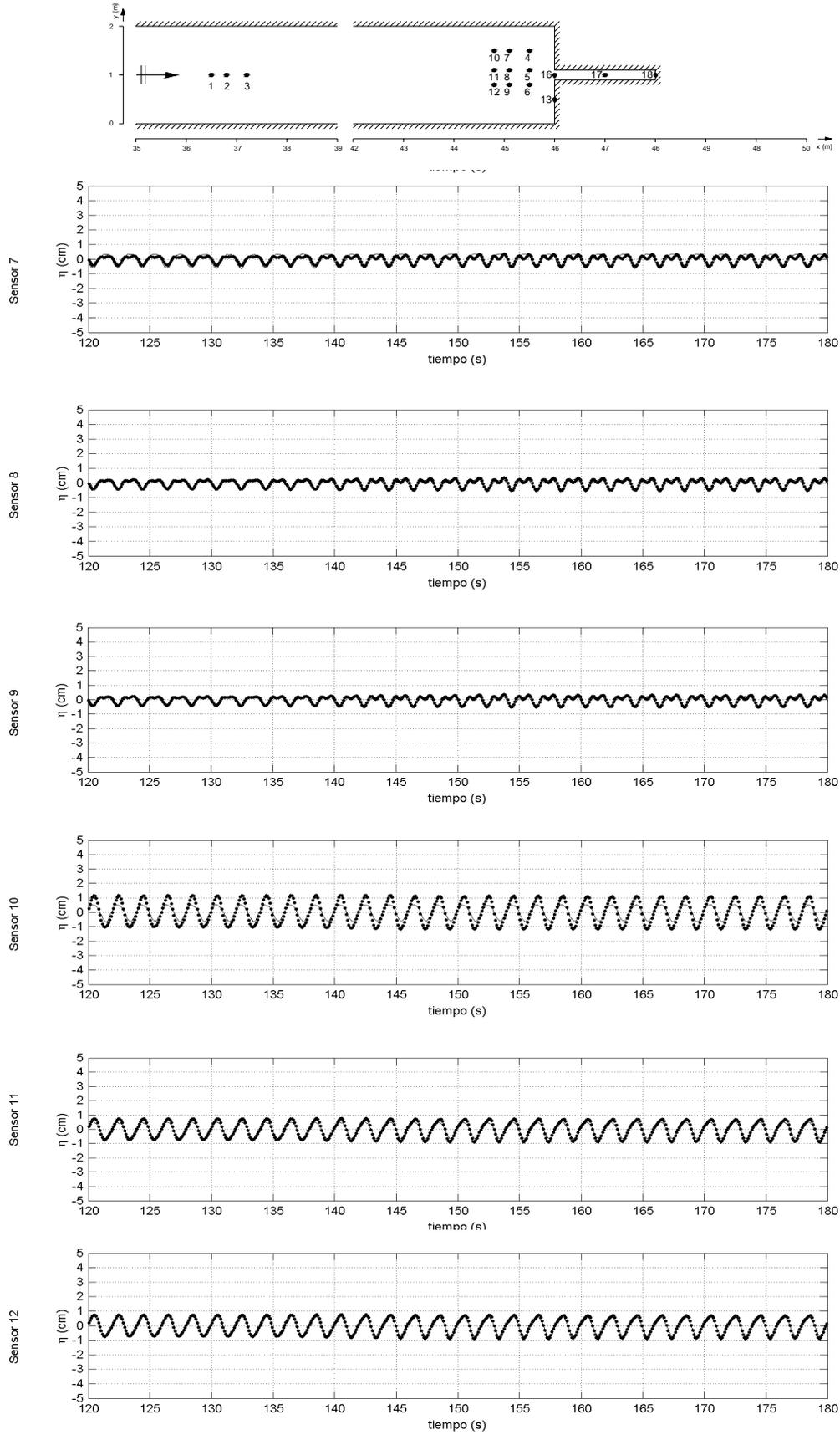


Figura 7.14 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 7 a 12.

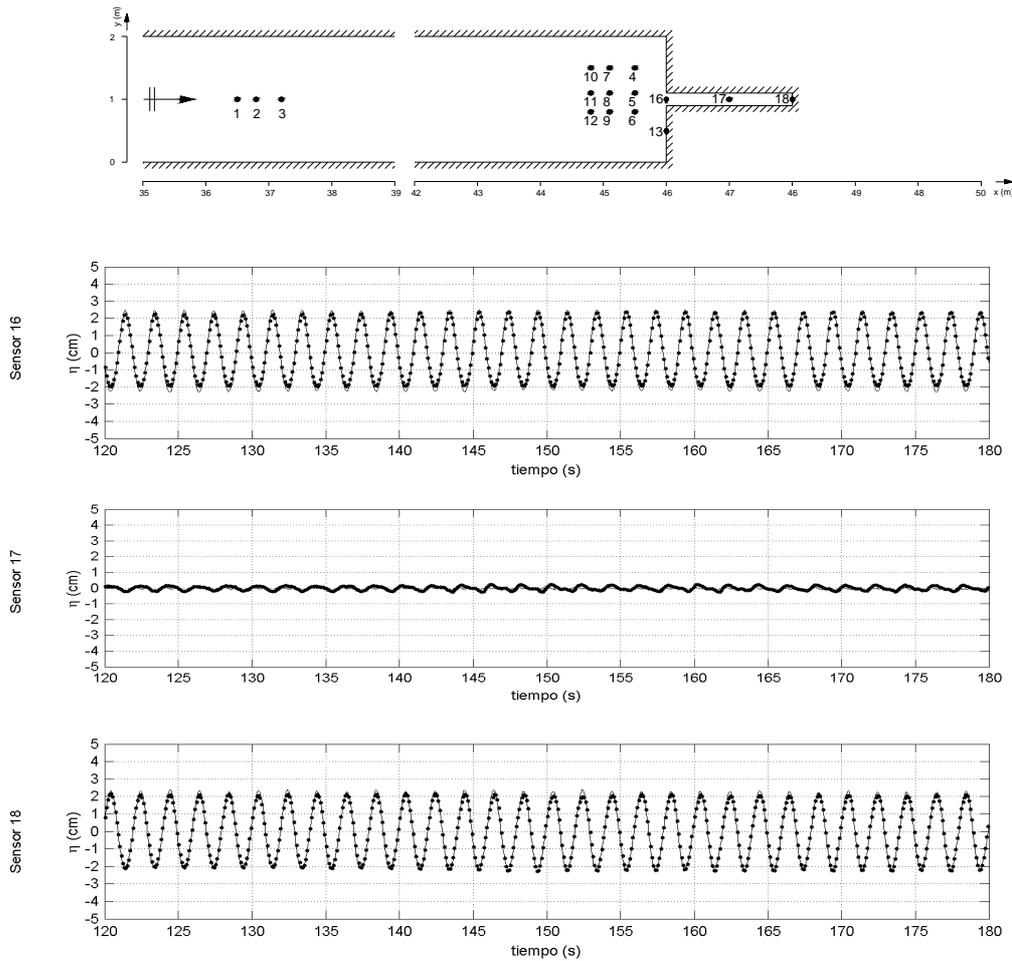


Figura 7.15 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 16 a 18.

El comportamiento del modelo numérico MANOLO se puede observar con detalle en la representación espectral obtenida con la técnica FFT para los 18 puntos de control seleccionados, mostrados en la figura 7.16.

En la figura 7.16, los resultados modelados numéricamente consiguen alcanzar adecuadamente los valores obtenidos con las mediciones numéricas, para todos los puntos utilizados, encontrando una alta correlación para los armónicos existentes (primero y segundo), prácticamente en todos los sensores.

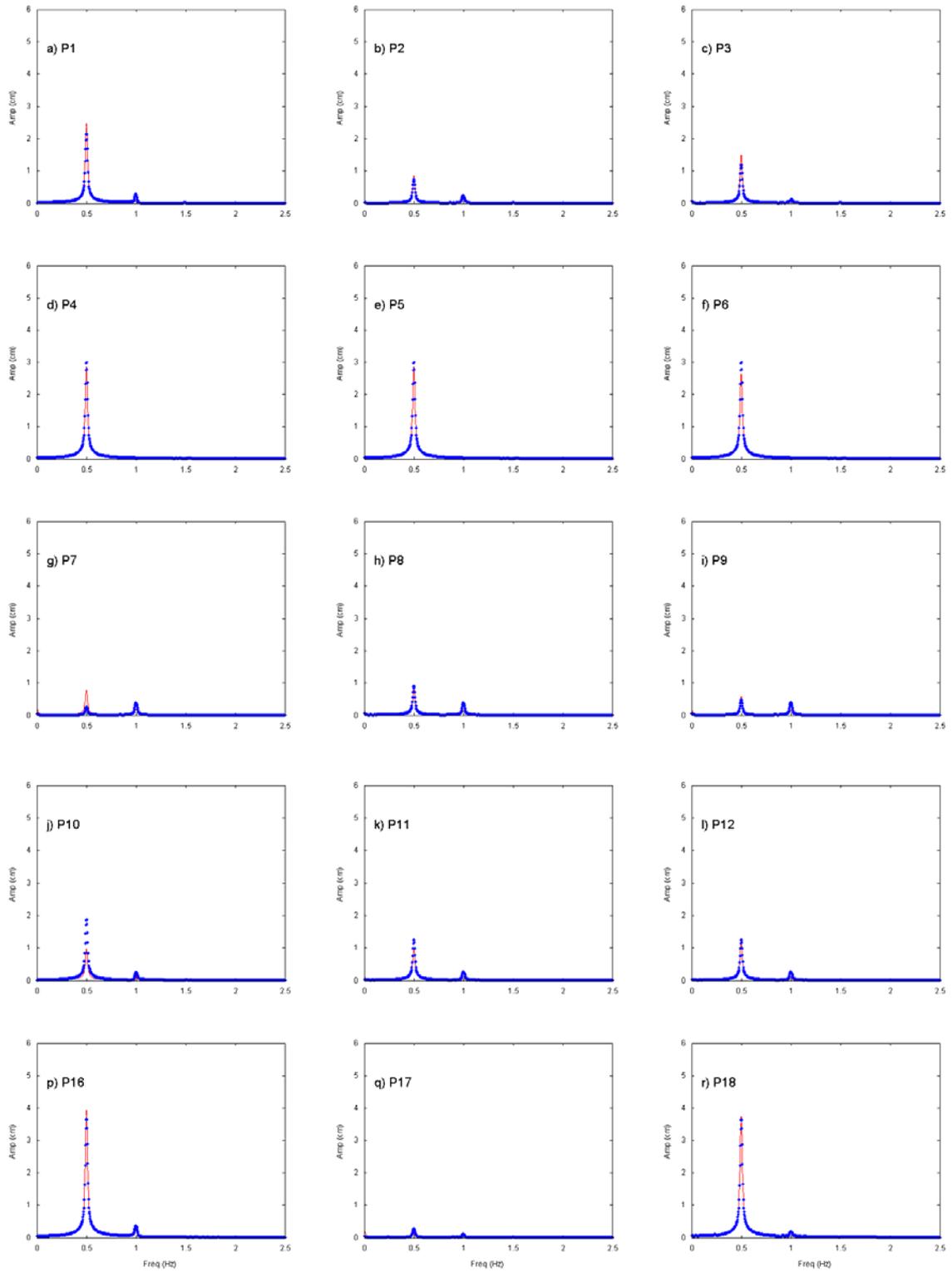


Figura 7.16 Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 0202.

Cabe esperar que, en general, el modelo se comportará adecuadamente con este tipo de casos en los que la baja no linealidad y ausencia de resonancia favorecen que el modelo reproduzca adecuadamente la transformación del tren de ondas dentro y fuera de los puertos. Únicamente para los puntos situados en las líneas de los sensores 7 a 9 y 10 a 12, es visible la presencia de una transferencia de energía hacia el segundo armónico de alrededor de 0.1 cm.

b) Con resonancia

A continuación, se presentan los resultados numéricos del caso 0303, que consiste en un solo puerto abierto de 3 m de longitud, con fuertes características de resonancia no lineal y de transferencia energética entre componentes frecuenciales.

Este caso de validación se puede considerar como representativo de un conjunto de casos con un solo canal portuario abierto, en el que la resonancia induce procesos no lineales especialmente adecuados para analizar la capacidad del modelo de reproducir fenómenos que no son abordables con los modelos clásicos basados en la ecuación lineal de la pendiente suave.

Las figuras 7.17 a 7.19 muestran las comparaciones de las series temporales de superficie libre obtenidas numéricamente (puntos), comparados con las series medidas en laboratorio para el caso 0303 ($H=0.05\text{m}$, $T=2\text{s}$).

Una primera observación muestra que, en general, los valores numéricos de la serie temporal de la superficie libre presentan una adecuada correlación con los valores medidos en laboratorio.

En el sensor 1 se observa que, para el intervalo de tiempo mostrado, ya se ha alcanzado una situación estacionaria. Sin embargo, se puede apreciar que aunque la fase es correcta, el modelo numérico infravalora la energía en todos los armónicos presentes. Este efecto deja de ser tan pronunciada a medida que nos movemos en la dirección de avance de las ondas, sensores 2 y 3. En el sensor 3, el efecto de la reflexión en la pared frontal del puerto se pone claramente de manifiesto en un aumento de la altura de la

onda incidente. Por tanto, parece razonable inferir que en los sensores 1 y 2, donde el efecto de la generación es más importante, existen mayores divergencias entre el mecanismo de absorción activa utilizado en el canal experimental y la esponja que hace las veces de absorción en el modelo. En este sentido es necesario recordar que el primero consiste en una pala con absorción mecánica, y el segundo propone una zona de generación interna en el dominio con una zona de absorción de enfriamiento newtoniano. Evidentemente, si el sistema de absorción activa presente en el canal experimental no es perfecto, las divergencias serán cada vez mayores cuanto mayor y más no lineal el tren de ondas producto de la reflexión en la pared frontal del puerto.

Los sensores (4,5 y 6) muestran un aumento de la altura debido a la reflexión anteriormente comentada. En este caso, los tres sensores son semejantes no haciéndose evidente la presencia de una onda transversal, debido a la simetría del problema. Se puede extraer conclusiones semejantes en relación con lo observado en los sensores (7, 8 y 9; 10, 11 y 12). No obstante, la distribución de la energía en los diferentes armónicos muestra pequeñas diferencias en el análisis espectral realizado que no en todos los casos es reproducida correctamente por el modelo numérico. Esto es especialmente visible en aquellos sensores cercanos a la zona de radiación.

Sin embargo, en el interior de la dársena (16, 17 y 18), el acuerdo entre el modelo numérico y los resultados es altamente satisfactorio, especialmente en el último sensor donde se alcanzan amplitudes máximas 10 veces mayores, $\delta = (H/h) \approx (0.5/0.5) = 1$, claramente en el rango de la no linealidad. El nodo del modo fundamental que es donde se obtiene el mejor ajuste, se localiza en el entorno de la alineación (10, 11, 12).

En general, y como se verá en otros casos algunos de los errores observados tienen su origen en la complejidad del flujo en la zona de la bocana de los puertos, particularmente en la zona de radiación (sensores 5, 8 y 11), debido a la presencia de importantes efectos de chorro, vorticidad y en ocasiones por separación de flujo. Estos fenómenos son especialmente visible cuando se producen grandes sobre-amplificaciones resonantes que introducen un fuerte gradiente de altura de ola en la zona de la bocana del canal portuario, tal y como lo menciona Lepelletier (1980), que señala que el conjunto de procesos asociados a los efectos de chorro en una bocana

portuaria que sufre sobre-amplificaciones resonantes, actúa como un fuerte elemento disipador de energía.

El modelo numérico, en su versión actual no contempla dichos procesos de disipación tridimensionales de alta complejidad, y la disipación por fricción que el modelo utiliza no alcanza a gestionar en su totalidad estos procesos. Por ello, aparecen ciertas diferencias entre los resultados numéricos y experimentales que, sin embargo, no superan el 7%.

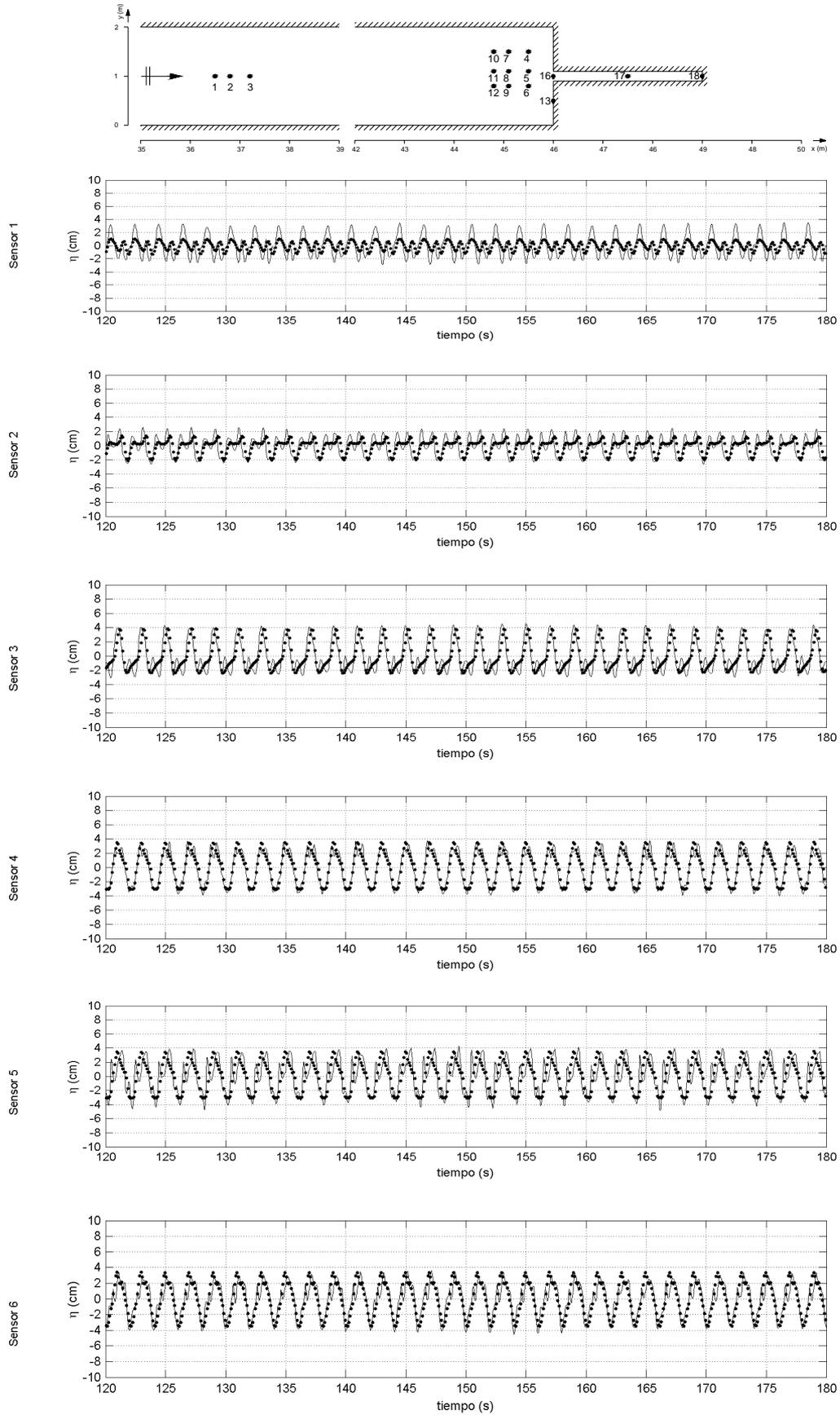


Figura 7.17 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0303, $H=0.05m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.0123$; $\delta = 0.1$. Sensores 1 a 6.

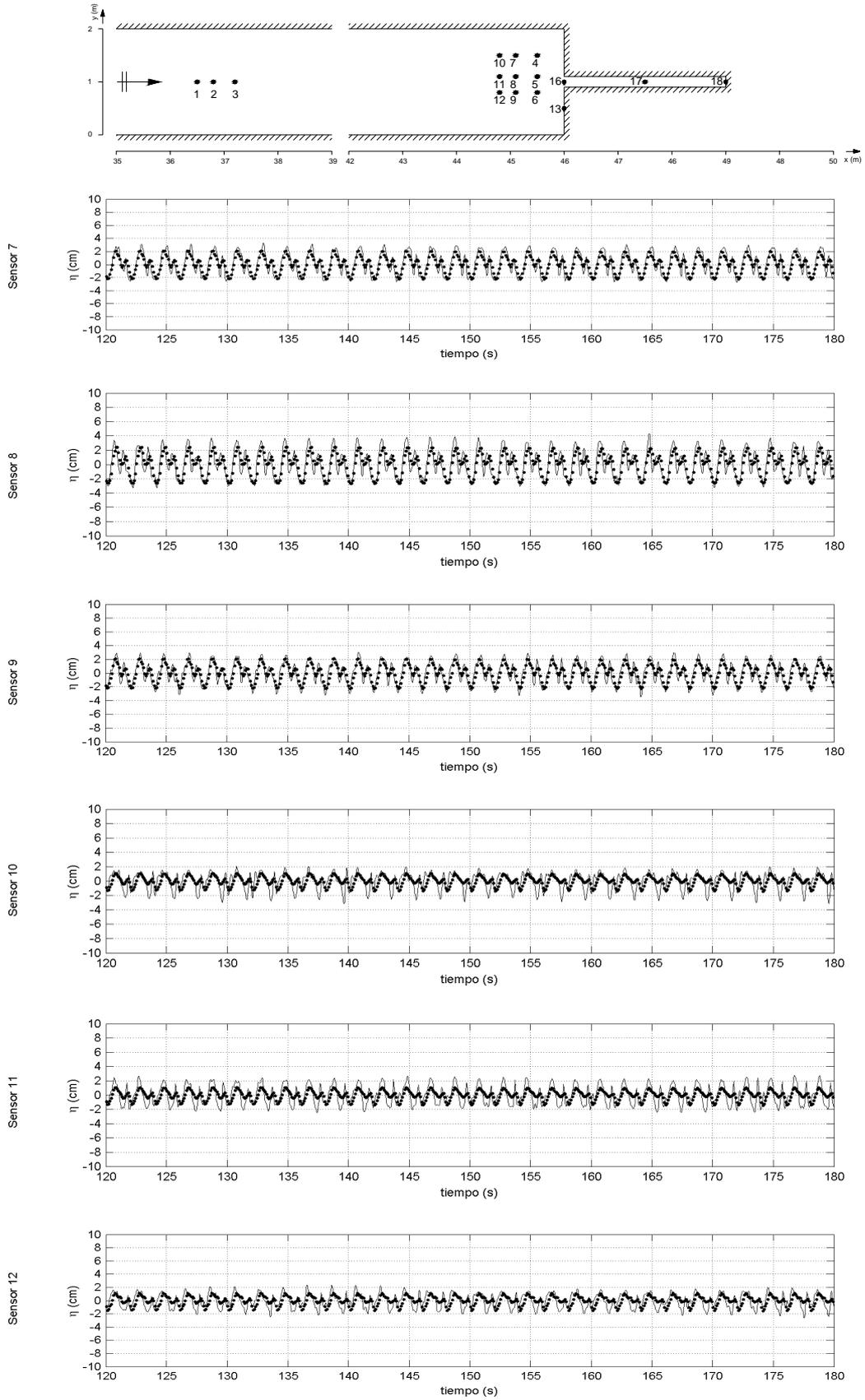


Figura 7.18 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0303, $H=0.05m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.0123$; $\delta = 0.1$. Sensores 7 a 12.

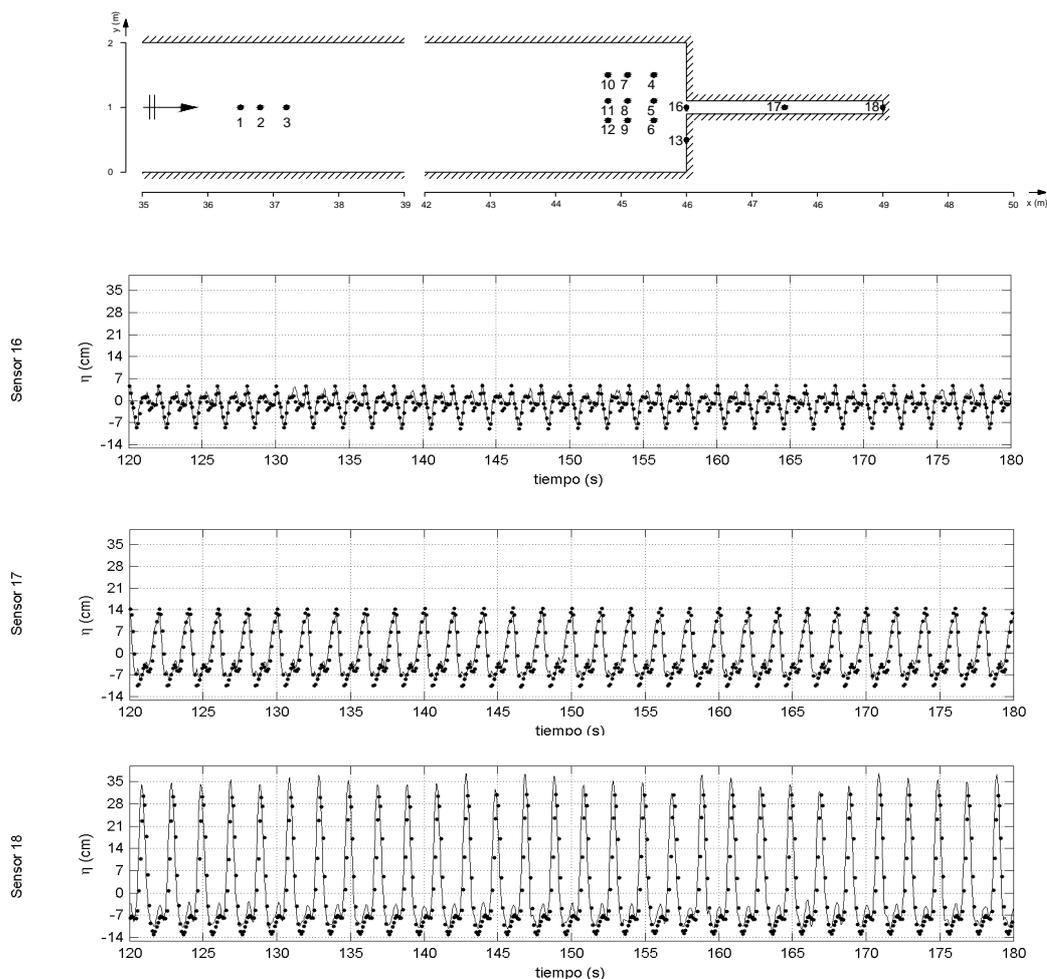


Figura 7.19 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0303, $H=0.05m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.0123$; $\delta = 0.1$. Sensores 16 a 18.

Las figuras 7.17 a 7.18 muestran que los sensores 5, 8 y 11 presentan correlaciones más deficientes, por los fuertes efectos de chorro mencionados anteriormente, mientras que la figura 7.19 muestra que el modelo es capaz de resolver la transformación que sufre la onda incidente al sobre amplificarse por los efectos resonantes, deformando la onda en el interior del puerto que pasa a tener senos cortos y crestas largas y una fuerte asimetría con respecto al eje vertical de simetría de la onda y al nivel en reposo.

Como ya se ha dicho, estos efectos de sobre amplificación son adecuadamente simulados por el modelo numérico como se pueden observar con más detalle en las representaciones de espectros de amplitudes obtenidos para los 18 puntos de control, mostrados en la figura 7.20.

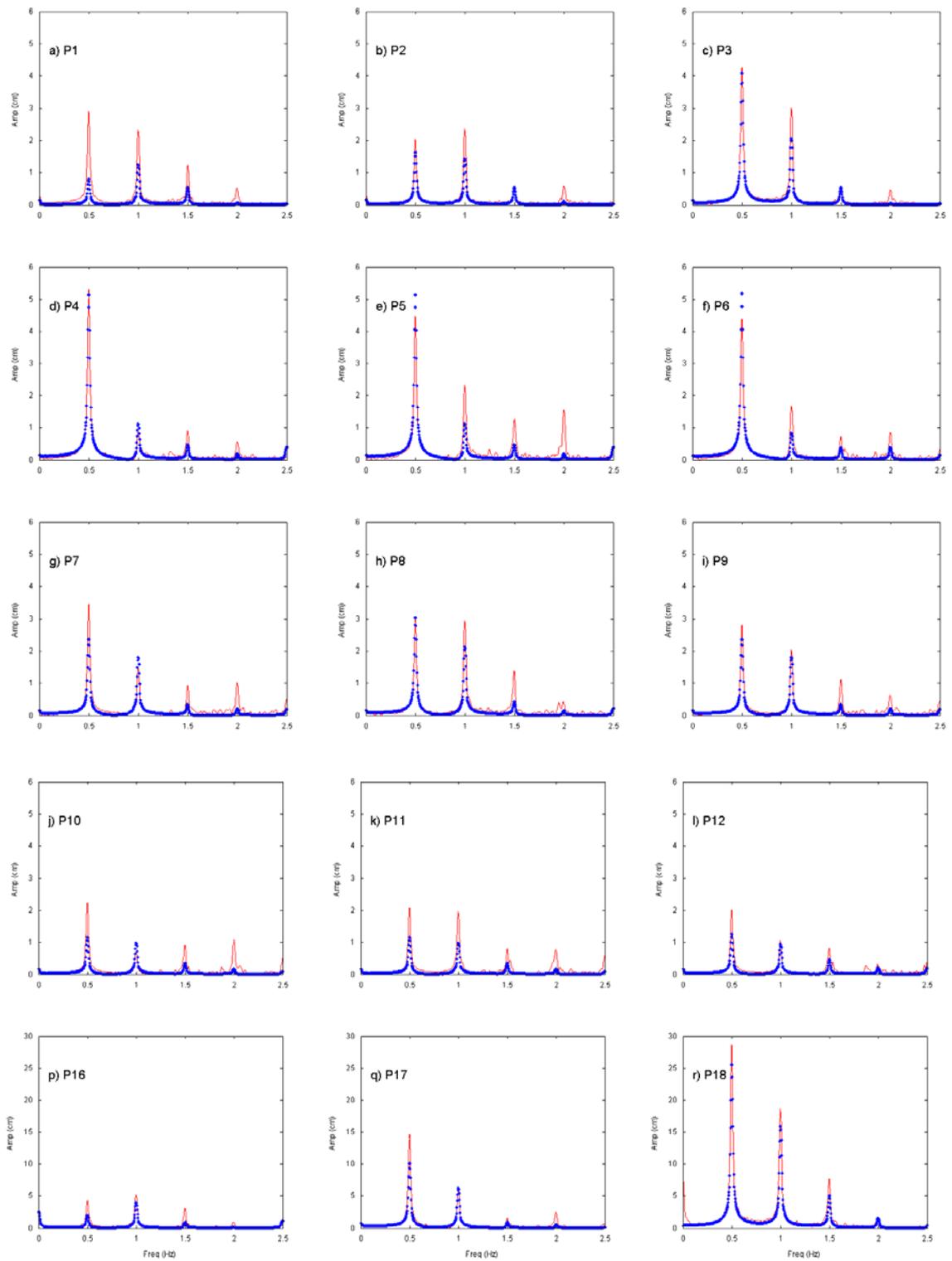


Figura 7.20 Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 0303.

La figura 7.20 presenta las amplitudes para cada armónico obtenidas numéricamente, y comparadas con las correspondientes para las mediciones en laboratorio. Se verifica la fuerte transferencia de energía de unos a otros armónicos en todos los puntos de control, especialmente para aquellos situados en la zona de radiación, en la bocana y dentro del canal portuario.

El caso 0303, presenta características importantes de no linealidad, llegando a transferir parte de la energía incidente al segundo y tercer armónico, y alcanzando valores de amplificación espectral de hasta 5 cm para el punto al final del puerto (sensor 18), situación que reproduce con una muy buena correlación el modelo numérico.

7.3.3 Dos puertos abiertos

a) Sin resonancia (ambos puertos)

A continuación, se muestra la comparación entre los resultados de las series temporales de superficie libre obtenidas con el modelo numérico y experimentales para el caso de agitación no resonante de dos puertos adyacentes excitados con una onda monocromática con una altura de ola de $H=0.025$ m, y un periodo de $T=2$ s.

Se trata del caso 1302, que sirve para mostrar el comportamiento que tiene el modelo numérico para un caso de agitación no resonante de características lineales. Además, permite la verificación de las correlaciones entre los resultados del modelo y los experimentales cuando la geometría incluye dos canales portuarios adyacentes que bajo circunstancias resonantes pueden sufrir efectos de acoplamiento. Ambos canales portuarios tienen una longitud de 4m.

Según se aprecia en las figuras 7.21 a 7.23, las correlaciones alcanzadas entre datos numéricos y experimentales es excelente a lo largo de toda la simulación.

La zona de incidencia es reproducida adecuadamente, al igual que la línea de sensores 4 a 6 que presentan una reflexión perfecta desde el final del canal portuario, sin manifestación alguna de onda transversal o efectos turbulentos en las bocanas portuarias.

La línea de sensores numéricos 7 a 9 registra un nodo de la onda, respetando las fases y las pequeñas amplitudes que la onda adopta en dicha línea nodal. Únicamente, se observa una discrepancia en los sensores 7 y 9, donde existe un claro desfase de cerca de 90° . Este desfase se debe probablemente a un error en el posicionamiento de los sensores durante los ensayos en laboratorio, pues no parece coherente que la correlación en el resto de los sensores del canal sea perfecta y que solo se muestren discrepancias en estos sensores.

La figura 7.23 presenta los resultados obtenidos para los puntos situados dentro de los canales portuarios, observando que para los puntos de la bocana, los puntos medios, y los puntos al final de ambos canales la correlación es excelente. Para este caso se puede observar la ausencia de resonancia.

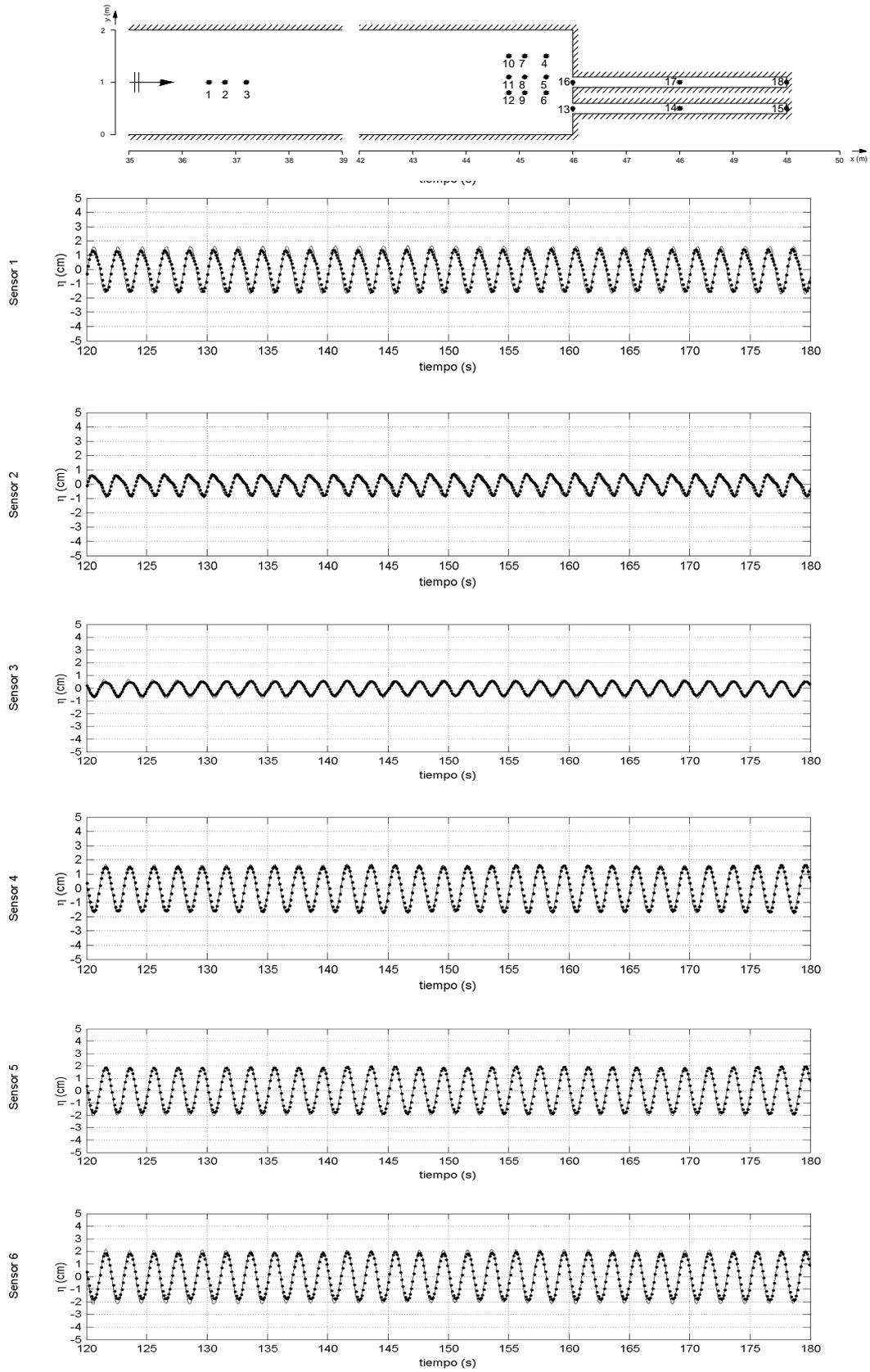


Figura 7.21 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1302, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6.

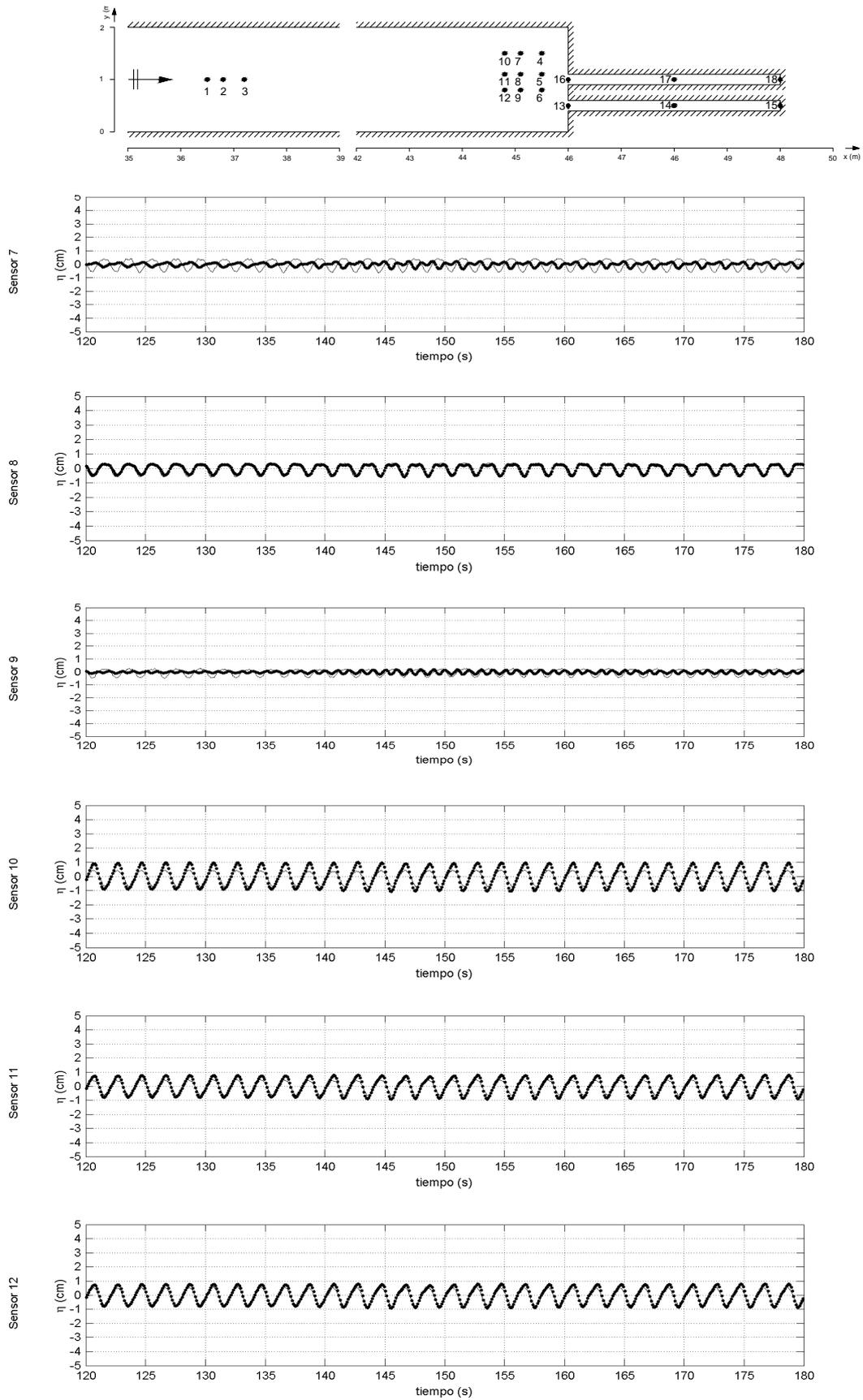


Figura 7.22 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1302, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 7 a 12.

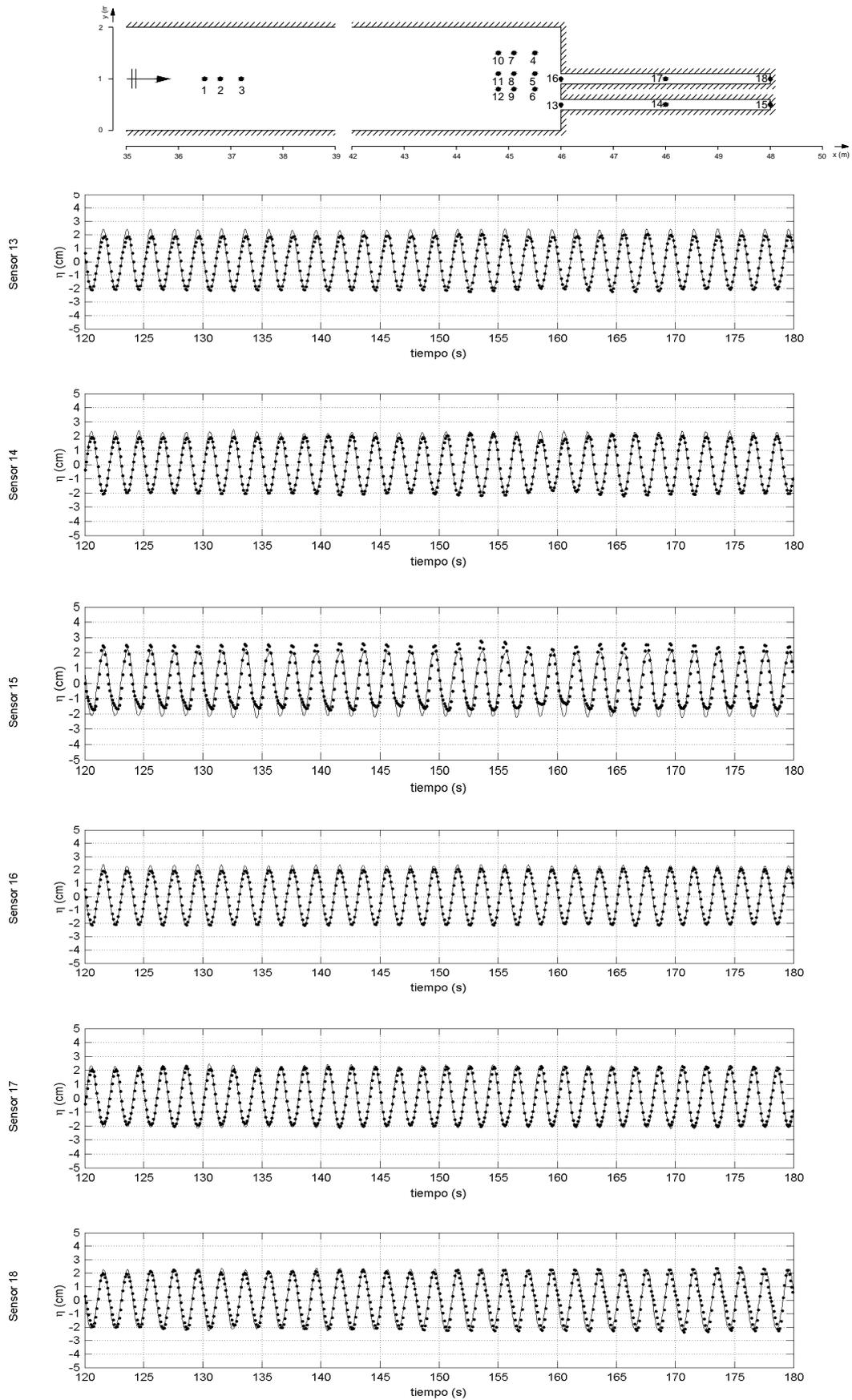


Figura 7.23 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 0302, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 13 a 18.

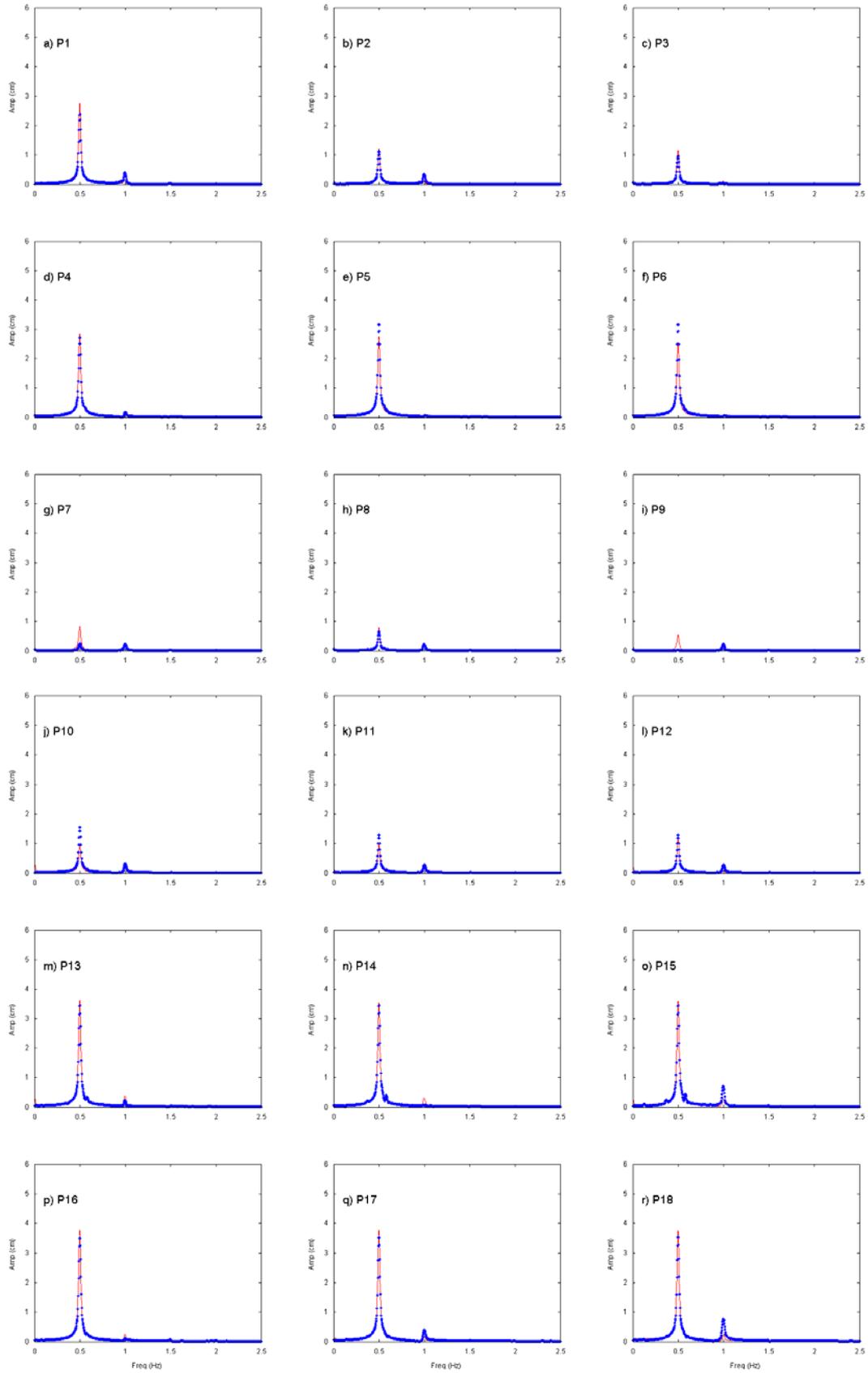


Figura 7.24 Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 1302.

La figura 7.24 muestra las comparaciones de los espectros de amplitudes calculados numéricamente y para los datos experimentales. Se puede verificar que la transferencia de energía entre armónicos es limitada. El acuerdo entre los espectros numérico y experimental es muy bueno en todos los sensores, exceptuando los sensores 7 y 9 donde el modelo numérico no evalúa correctamente la amplitud correspondiente al armónico principal. Sin embargo, y como ya se ha indicado anteriormente, se considera que este problema está más bien asociado a una incorrecta localización del sensor durante el proceso de calibrado que no a un problema numérico.

b) Con resonancia (ambos puertos)

En este apartado se presenta el caso de validación del modelo numérico para la situación de dos puertos adyacentes, ambos de longitud igual a 3 m, que experimentan episodios de resonancia portuaria por la acción de un forzamiento monocromático con una altura de onda $H=0.025\text{m}$, y un periodo de $T=2\text{s}$.

La simulación en cuestión corresponde al caso 1702 de las experimentaciones realizadas en el laboratorio descrita en el capítulo 5 de esta Tesis.

Contar con dos puertos adyacentes que presentan características resonantes permite verificar los alcances y capacidades del modelo numérico utilizado, para evaluar los procesos asociados al fenómeno de resonancia portuaria, con condiciones de acoplamiento y características no lineales en el flujo, traducido esto en características de transferencia energética entre componentes frecuenciales.

En principio, cabría esperar que al ser sometidas a un mismo forzamiento incidente y contar con las mismas características geométricas y calados, el comportamiento resonante se produciría en condiciones equivalente si no iguales.

Las figuras 7.25 a 7.27 muestran las series temporales de superficie libre obtenidas con el modelo numérico, para los 18 puntos de control y para el caso de simulación 1702.

Se observa que la línea de sensores localizados en la zona de incidencia (sensores 1, 2 y 3), mide los valores numéricos siguiendo los patrones de superficie libre definidos por las medidas de laboratorio. Las correlaciones son buenas y se aprecia en los sensores mencionados que el modelo es capaz de simular las diversas características que sufre la onda en la zona de incidencia, mostrando numéricamente con claridad la no linealidad correspondiente a la superficie libre. Se observa que, salvo por un pequeño defecto en el armónico principal en el sensor 2, el acuerdo es correcto. La modulación que sería observable en un gráfico de envolventes de la superficie libre pondría aún más claramente de manifiesto el papel que la reflexión inducida en la generación y pared frontal del sistema portuario, tiene sobre las series temporales observadas.

En las alineaciones (4,5 y 6; 7, 8 y 9) se pone claramente de manifiesto la presencia de una onda transversal en el canal experimental que da lugar a amplitudes máximas en el lado izquierdo del canal y mínimas en el lado derecho para el periodo de tiempo considerado. La reflexión en la parte frontal de los puertos, donde se sitúan las bocanas, es claramente apreciable en los sensores 4 y 7 debido a la generación de una onda prácticamente estacionaria. El modelo reproduce correctamente estas observaciones.

En la alineación (10, 11 y 12) este mismo efecto de la onda transversal es visible aunque en menor medida. Más aún, el modelo numérico no reproduce adecuadamente la superficie libre en el sensor 10. Sin embargo, esto es más bien achacable a un incorrecto posicionamiento de los sensores numérico y experimental, pues no parece coherente el desfase y los valores mostrados para este valor en comparación con lo obtenido en el resto de los sensores.

Los sensores 16 y 13 situados en las bocanas muestran la presencia de los nodos correspondientes al modo principal de oscilación de las dársenas. Los antinodos, como era esperable, aparecen en los sensores 15 y 18, al final de las dársenas. En todos los casos el acuerdo con los datos numéricos es muy bueno. Sin embargo, y aunque las características de las dársenas son idénticas y el forzamiento generado inicialmente, el mismo, se puede observar claramente que la dársena excéntrica tiene una respuesta mucho menos energética que la situada en el centro de la dársena. Para la primera se alcanzan unas amplitudes máximas de unos 6 cm, poco más que el doble que la

incidente, y para la segunda, casi 18 cm. Como se verá, más adelante, la generación del modo transversal en el canal experimental inducido por la radiación asimétrica que se produce en la bocana da lugar a una modificación en el proceso resonante que se produce finalmente. Es decir, el acoplamiento entre modos inducidos por geometrías complejas, pueda dar lugar a modificaciones importantes en la respuesta de las dársenas.

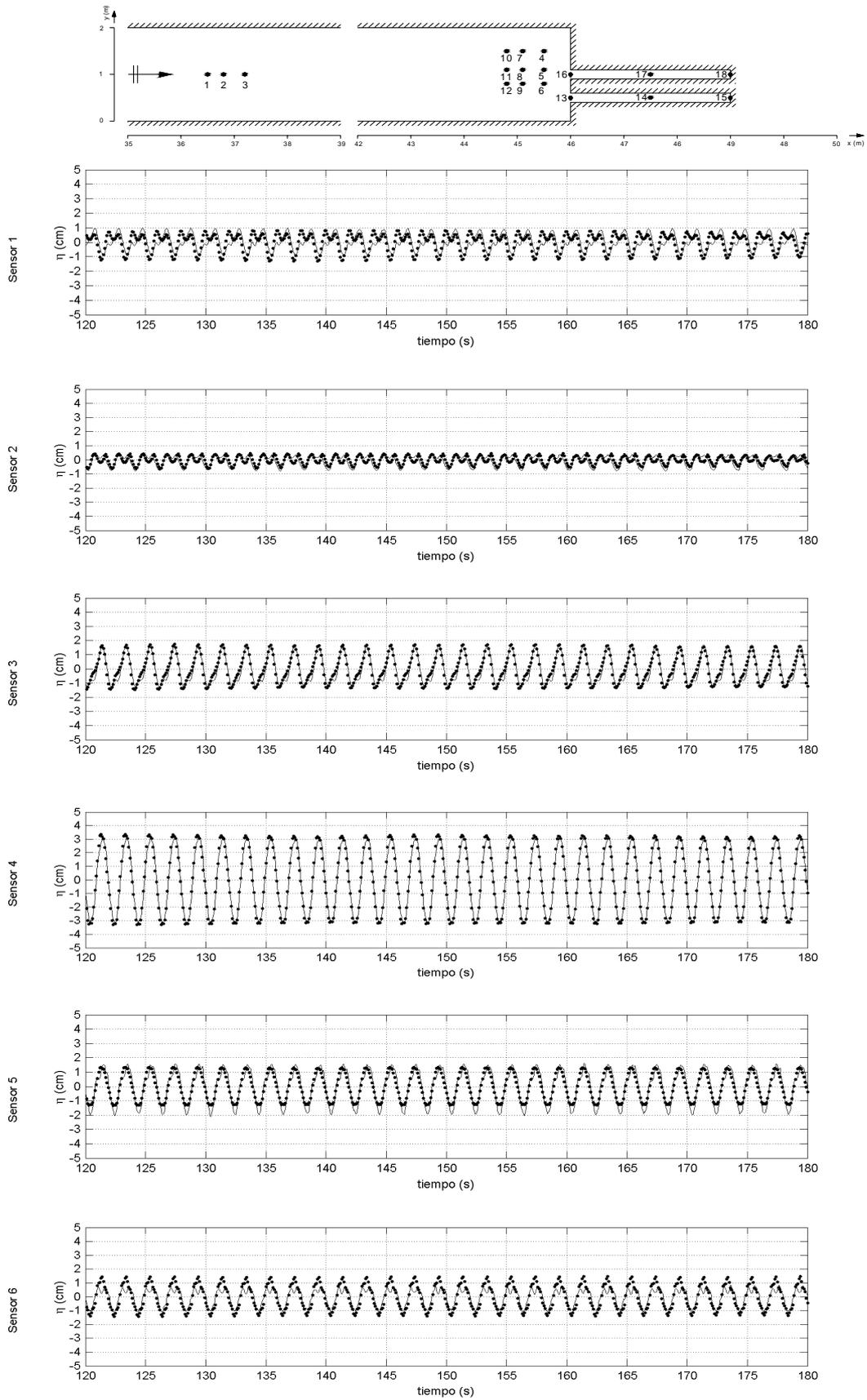


Figura 7.25 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6.

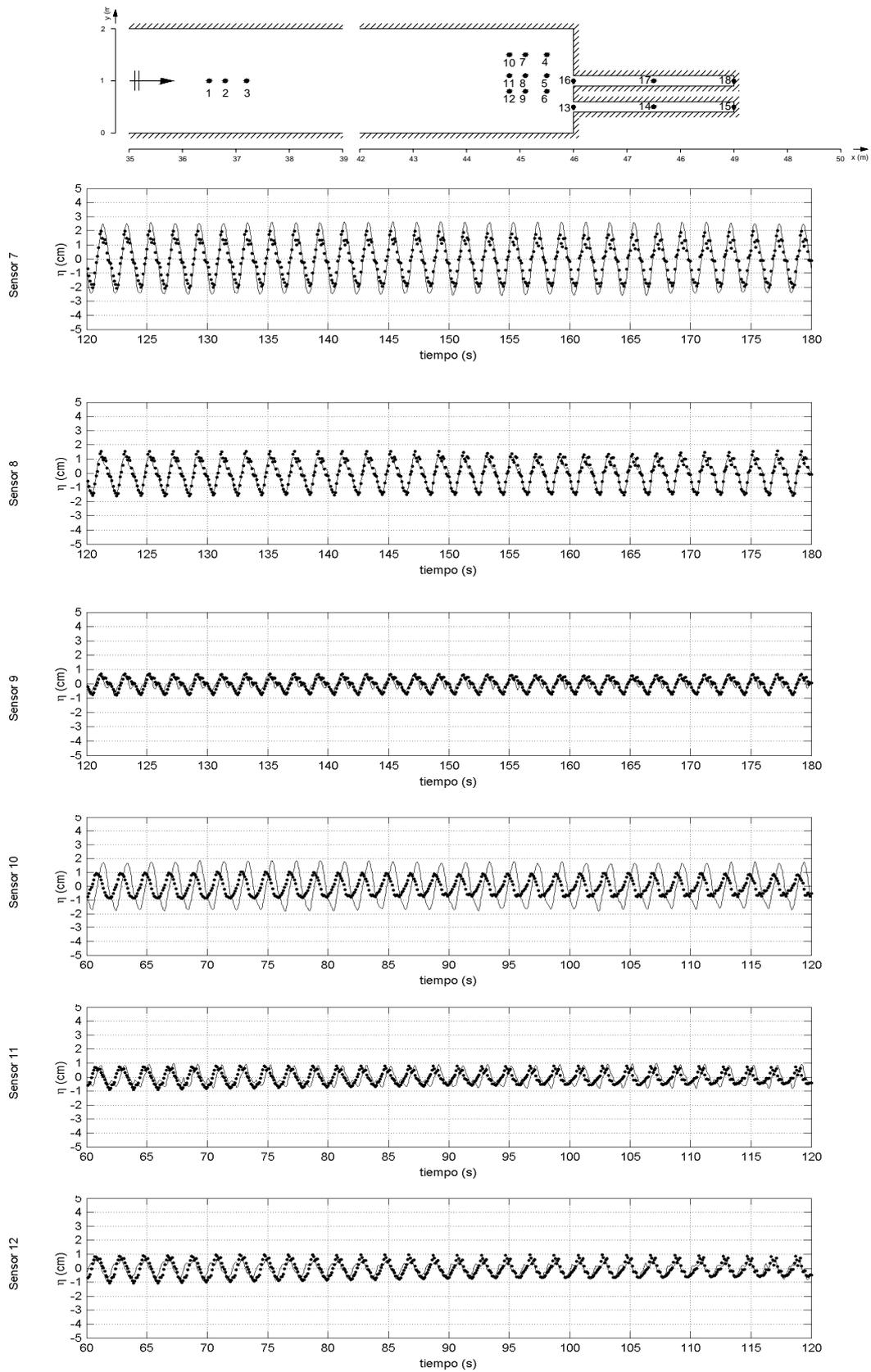


Figura 7.26 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 7 a 12.

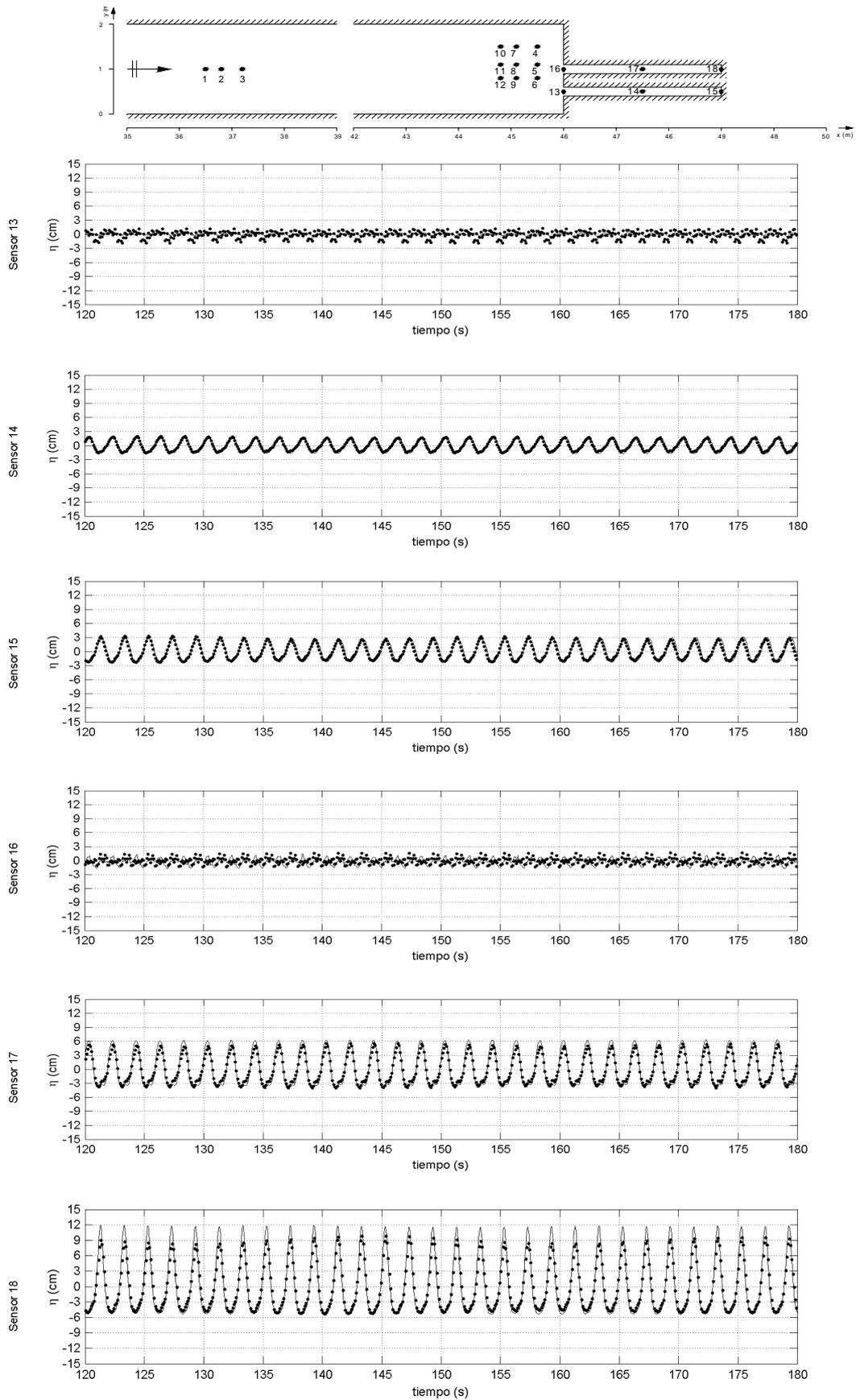


Figura 7.27 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 15 a 18.

La figura 7.28 muestra los valores de amplitud obtenidos con la técnica espectral FFT para los 18 puntos de medición numéricos y experimentales.

Se observa que los valores de la amplitud para los sensores de la zona de incidencia (1, 2 y 3), es reproducida adecuadamente por el modelo numérico, con únicamente un valor menos acertado para el primer armónico del sensor 2.

Los sensores numéricos de la zona de radiación también definen adecuadamente los valores de las amplitudes obtenidas con la técnica espectral, mostrando de forma más clara lo mencionado anteriormente sobre la existencia de una onda transversal que se mueve a lo ancho del canal de oleaje y que induce un complicado proceso bidimensional de oscilación dentro y fuera de las zonas portuarias.

La línea de sensores 4, 7 y 10 muestra los valores de amplitud cercanos al nodo de la onda transversal en combinación con los valores de la onda incidente, reflejada e irradiada desde ambas bocanas portuarias, observándose una disminución de la energía conforme las oscilaciones se sitúan sobre la línea de sensores 5, 8 y 11, y posteriormente sobre la línea 6, 9 y 12, mostrando que no solo existe una onda transversal si no que ésta sigue un patrón de movimiento asimétrico con respecto al eje medio longitudinal del canal de oleaje.

Los sensores ubicados dentro de los dos puertos en resonancia, registran condiciones de agitación distintas, en parte debido a la presencia de la onda transversal que interactúa con el puerto más cercano a una de las paredes del canal de oleaje (sensores 13, 14 y 15) que logra penetrar en el puerto y amortiguar las oscilaciones resonantes, mientras que el resto de la energía de la onda incidente actúa de manera similar al caso 0303 sobre el puerto principal (sensores 16, 17 y 18), pero en este caso inhibiendo la magnitud de las oscilaciones resonantes para los tres armónicos principales, y haciendo que el fenómeno de resonancia no se comporte exactamente igual que en el caso no lineal, previamente analizado, para un puerto resonante trabajando en solitario bajo las mismas condiciones geométricas y de forzamiento exterior.

Se puede decir que, en general, las complejas características de oscilación descritas en los párrafos anteriores son adecuadamente representadas por los resultados numéricos obtenidos a través de la utilización del modelo numérico MANOLO, demostrando así la efectividad que ofrece esta novedosa herramienta de análisis, para ampliar los estudios de resonancia hacia una visión bidimensional de los procesos de transformación asociados al fenómeno, ubicando cada singularidad observada en el tiempo y ponderando las características más evidentes del posible acoplamiento entre dársenas adyacentes bajo la presencia de episodios resonantes.

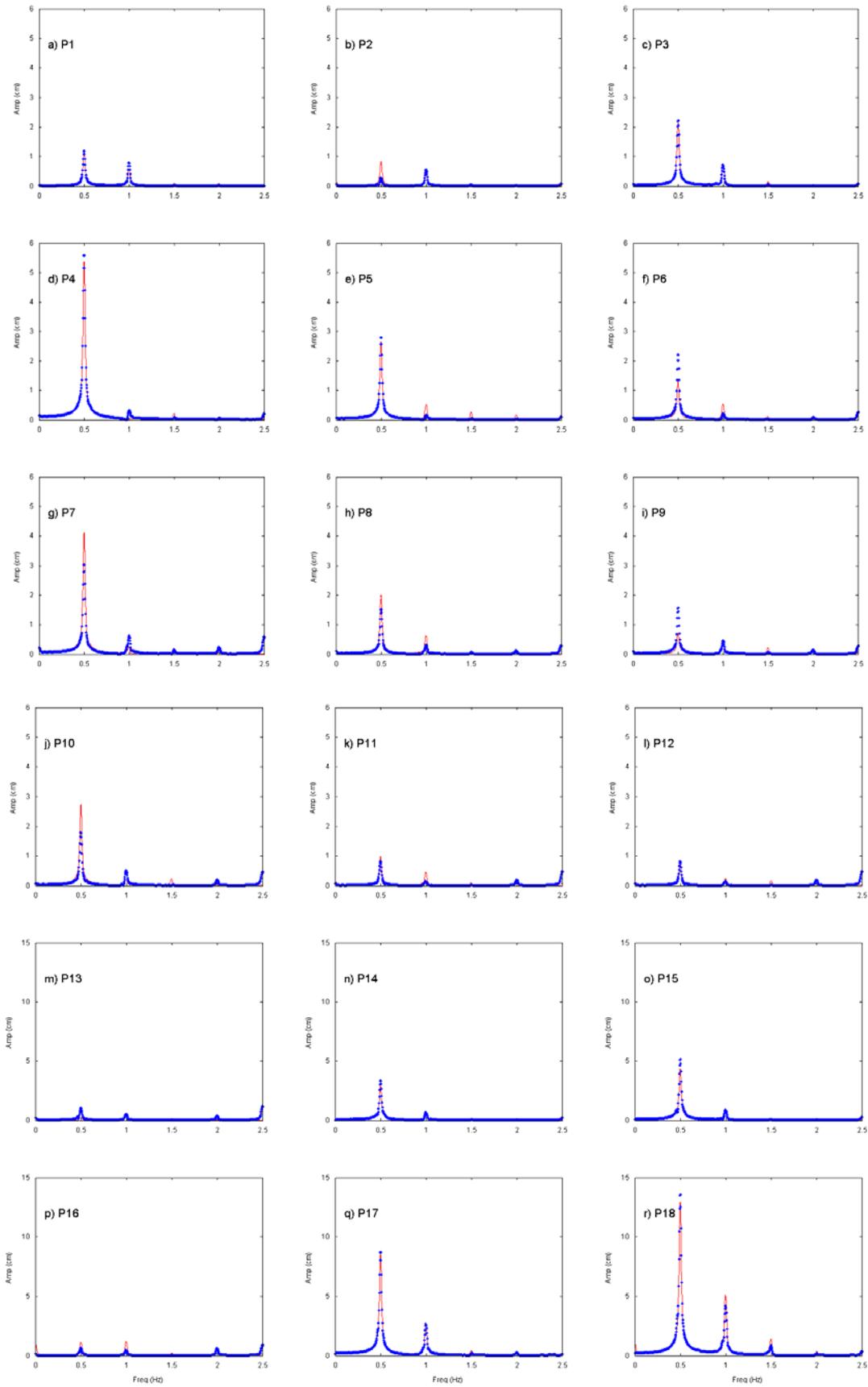


Figura 7.28 Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 1702.

c) Mixto (un puerto resonante y un puerto no resonante)

Se presenta, a continuación, un caso mixto (puerto resonante y puerto no resonante), que trata de mostrar las capacidades que el modelo numérico ofrece a la hora de realizar un estudio de agitación portuaria con efectos resonantes bajo geometrías alternativas, intentando así acercar el estudio de validación hacia puertos reales en donde las configuraciones distan mucho de mantener geometrías sencillas, simétricas u ordenadas.

El caso en cuestión (denominado caso mixto), es probablemente un caso que puede llegar a englobar un mayor número posibles configuraciones portuarias reales. Sin dejar de considerar que se trata de un caso basado en fuertes hipótesis simplificadoras por su sencilla geometría y por utilizar un elemento forzador simplificado, el caso mixto se puede extrapolar a la complejidad de casos a ser estudiados por el técnico. Por tanto, es un caso que por su casuística es necesario evaluar a través del uso de la herramienta numérica MANOLO, para determinar las capacidades y corroborar el buen funcionamiento que se ha venido observando en los ejemplos que anteriormente se han presentado en apartados superiores.

Se trata del caso de laboratorio 1202, que parte de una geometría en la que el primer puerto principal tiene una longitud $L=4\text{m}$, y, por tanto, es no resonante, y la existencia de un segundo puerto adyacente de $L=3\text{m}$, en principio, con características resonantes. La teoría lineal indica que la geometría propuesta para este caso en particular, arroja valores de resonancia para el puerto previamente mencionado (puerto 2 de 3 m de longitud), siempre y cuando la onda monocromática incidente conserve el periodo de $T=2\text{s}$, que hemos utilizado en todas las simulaciones.

El modelo numérico MANOLO, además de considerar las interacciones no lineales entre componentes, y resolver la dispersividad del oleaje con precisión, es capaz de evaluar aquellos sistemas oscilatorios que por su complejidad, presentan procesos con un mismo orden de magnitud en múltiples direcciones dentro del plano x - y .

Esto permite evaluar agitaciones portuarias con un gran peso multidireccional, a lo largo del tiempo y para cualquier puerto que se desee dentro del dominio computacional. El caso 1202 que se presenta en este apartado, a pesar de no ser un caso especialmente

energético de agitación, incluye claros procesos de generación de onda transversal asimétrica, amortiguamiento de las amplificaciones resonantes, y efectos de acoplamiento entre dársenas, tal y como se mencionó para el caso 1702 descrito anteriormente.

Las figuras 7.29 a 7.31 muestran las comparaciones de los registros temporales medidos en laboratorio y simulados numéricamente para el caso 1202, pudiéndose observar en primer lugar un muy buen comportamiento general de las series temporales obtenidas para los 18 puntos con el modelo numérico MANOLO.

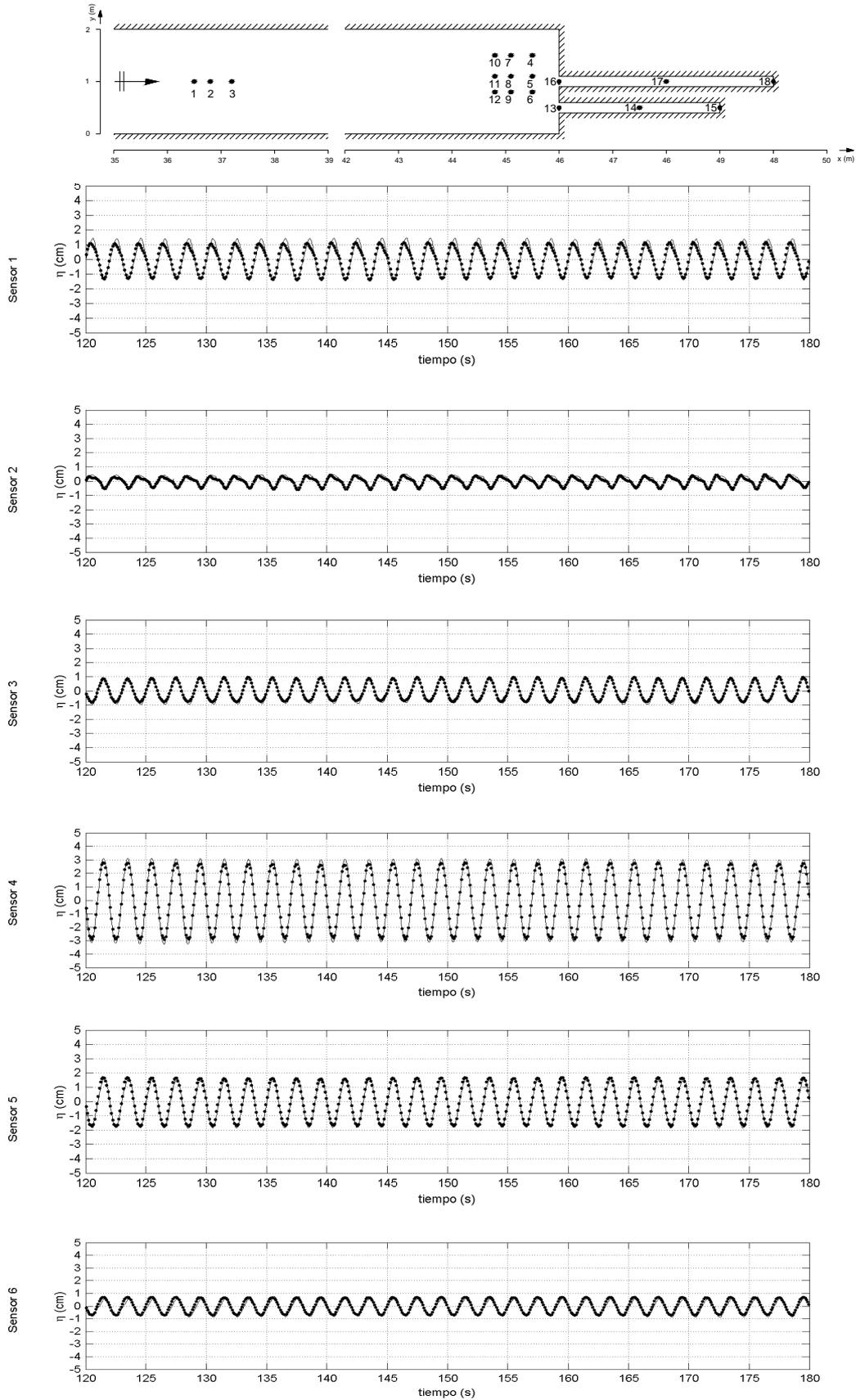


Figura 7.29 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. . $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6.

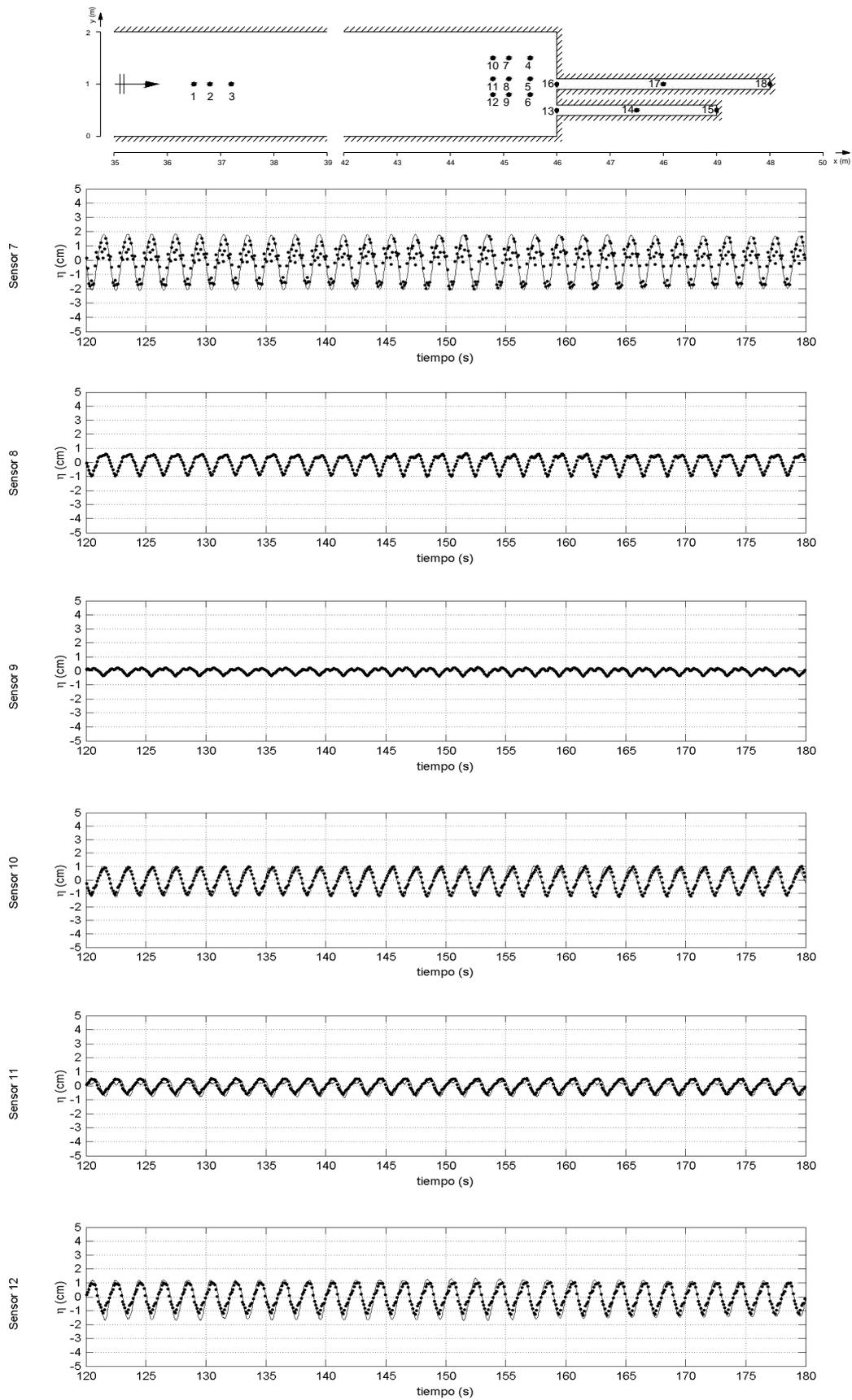


Figura 7.30 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso 1202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. . $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 7 a 12.

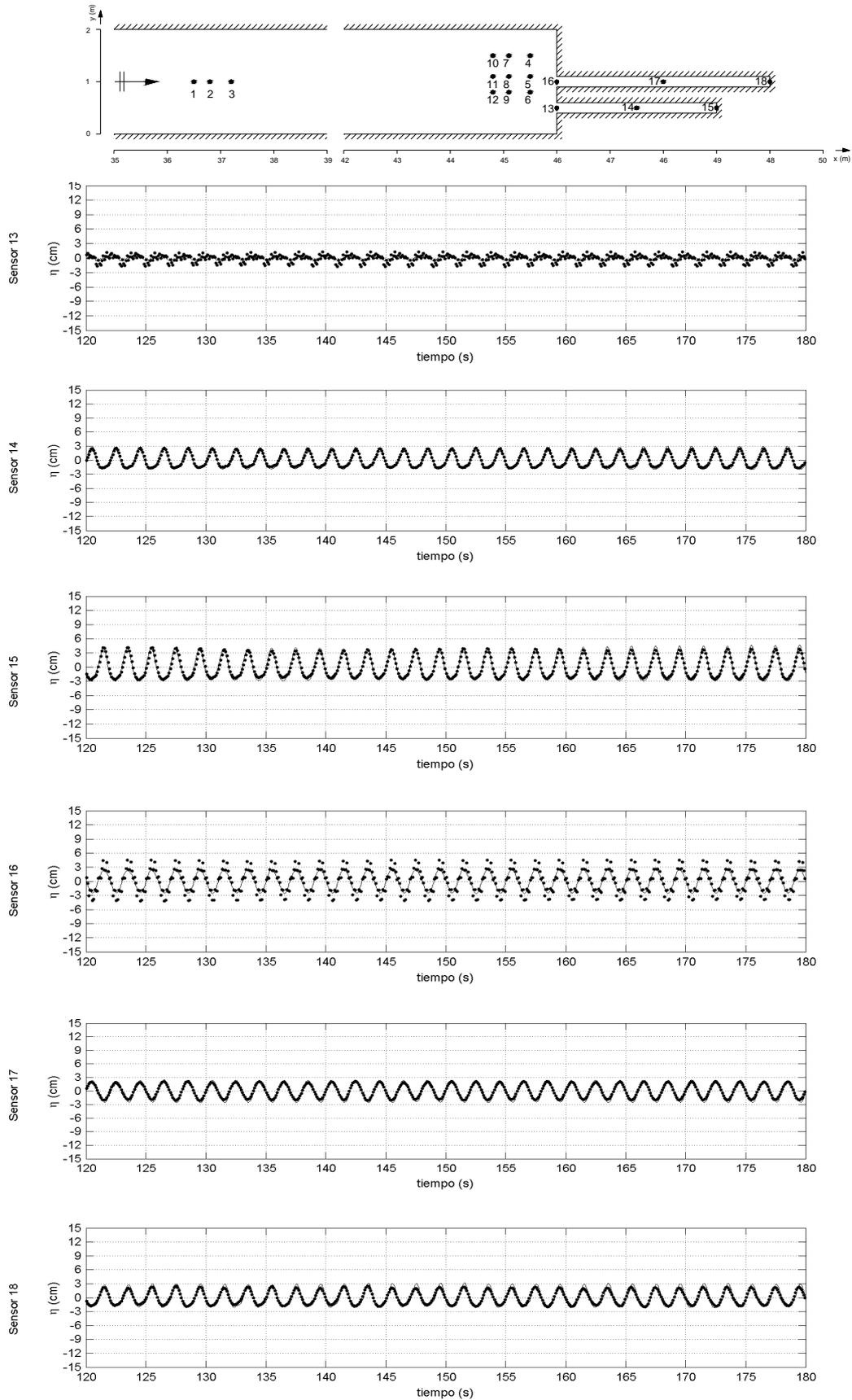


Figura 7.31 Comparación de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del caso I202, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. . $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 15 a 18.

Las figuras anteriores, muestran que para los sensores de la zona de incidencia (sensores 1, 2, y 3), las series temporales obtenidas numéricamente se asemejan en gran medida a las medidas en laboratorio, presentando amplitudes de aproximadamente 1 a 3 cm. La figura 7.32 representa los espectros de amplitud para los sensores en cuestión y apoyan lo observado en las series temporales obtenidas numéricamente.

La existencia de una onda transversal energética, producto de la asimetría del problema, se verifica en los espectros de amplitudes para los sensores de la zona de radiación, mostrando que el punto 4 representa la zona con mayores amplificaciones del primer armónico en la zona exterior a los puertos, y que dicha energía decae hacia la zona de los sensores 8 y 9, y moviéndose hacia los sensores 11 y 12.

Dentro de la zona portuaria, el puerto resonante (sensores 13, 14 y 15) presenta amplificaciones del primer armónico de cerca de 3 veces la altura de onda incidente, y con una transferencia de energía hacia el segundo armónico más baja con respecto a lo observado en puertos de las mismas características geométricas trabajando en solitario. No se puede hablar de resonancia para este segundo puerto, ya que las amplificaciones encontradas al final del canal portuario, son semejantes a las existentes en el exterior por presencia de la onda transversal.

Mientras que la bocana del puerto resonante (sensor 13) presenta un nodo de oscilación, la bocana del puerto principal no resonante (sensor 16) mantiene un antinodo en dicho punto, al igual que en su punto medio y final (sensores 17 y 18, respectivamente).

Lo observado anteriormente demuestra la importancia de utilizar un modelo numérico avanzado para analizar la agitación de un sistema portuario bajo condiciones resonantes complejas, no lineales, multidireccionales y con una fuerte interacción de agitación entre dársenas a lo largo del tiempo.

Los modelos numéricos y analíticos que hasta nuestros días se han venido utilizando para resolver y analizar problemas de resonancia portuaria, plantean sus resultados bajo hipótesis lineales y estacionarias del fenómeno, que limitan los resultados y en

ocasiones sobre-estiman las posibles acciones que el flujo ejerce sobre las estructuras portuarias.

El caso 1202, mostrado en este apartado, es un claro ejemplo de cómo una geometría a priori resonante, bajo condiciones de onda incidente óptimas para que esto ocurra, puede llegar dar lugar a oscilaciones resonantes inhibidas por la presencia de procesos residuales o acoplados, que co-existen con las sobre-amplificaciones resonantes y que son determinantes para inhibir o fomentar las magnitudes de onda de cálculo que actúa dentro y fuera de las dársenas portuarias. Es evidente, que el técnico debe contar con la herramienta necesaria para un correcto análisis de la hidrodinámica dado que esta condiciona el dimensionamiento, mantenimiento, gestión, o protección de las estructuras portuarias.

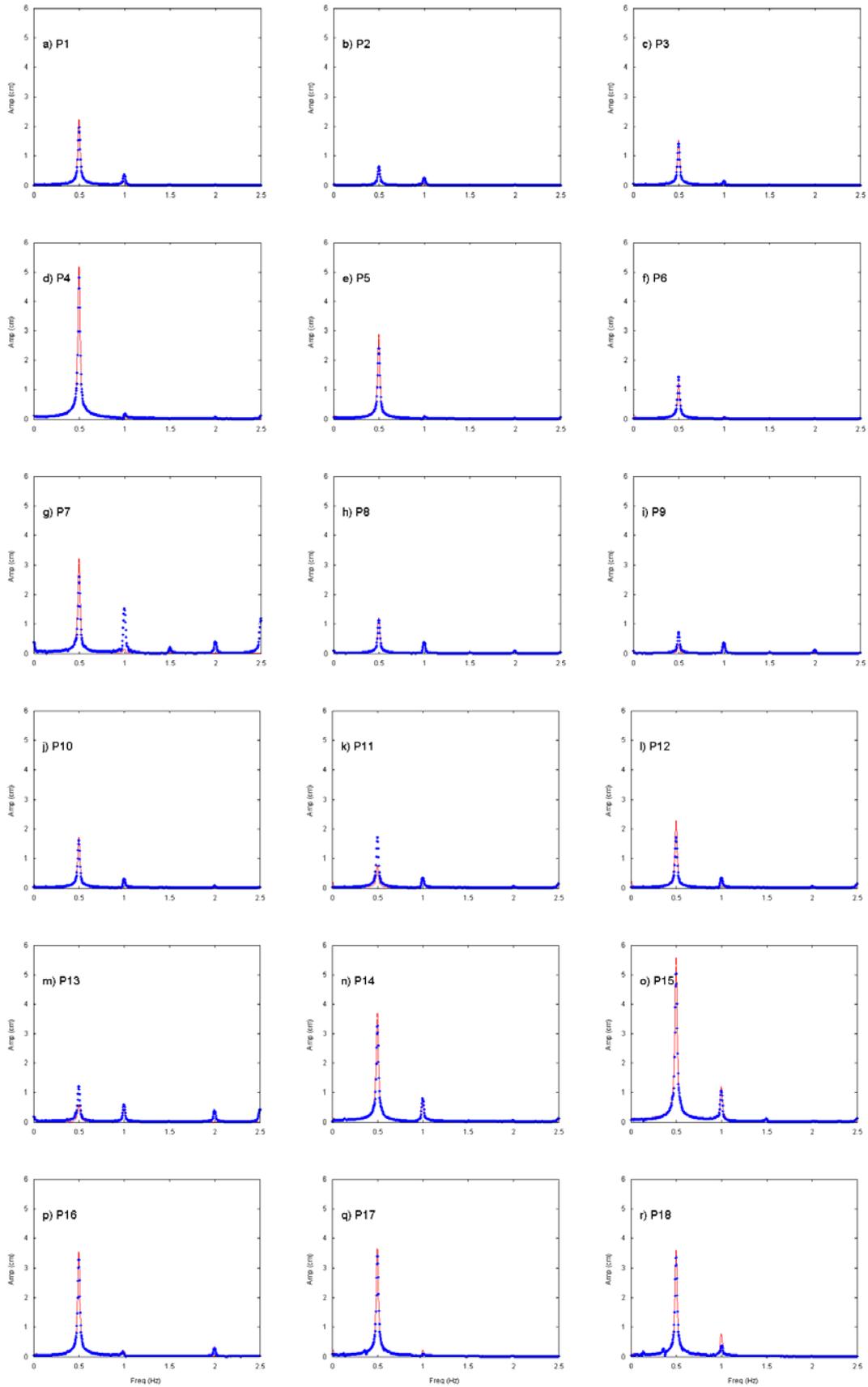


Figura 7.32 Comparación de los espectros de amplitudes numéricos (puntos azules) vs. datos de laboratorio (línea continua roja), obtenidos en todos los puntos de medición del caso 1202.

7.3.4 Resultados comparativos de los puertos resonantes

Una vez finalizado el análisis y la validación del modelo para los casos que se considera representativos de la mayor parte de las combinaciones posibles de procesos relevantes, en este apartado se presenta un resumen de las simulaciones realizadas con el modelo numérico para los casos de laboratorio que presentaron episodios de resonancia portuaria. Esto se debe a que los casos resonantes son los que albergan una mayor complejidad en el modelado.

Como objetivo, se plantea observar y analizar el comportamiento del modelo numérico para diferentes situaciones de resonancia, con una variada gama forzamientos, geometrías y condiciones de acoplamiento entre dársenas.

Se presentan cuatro casos que resumen la totalidad de las situaciones de resonancia observadas en el laboratorio. Esta categorización se puede dividir en dos grandes grupos: los puertos resonantes que trabajan en solitario (un canal portuario abierto), y los puertos que trabajan conjuntamente (dos canales portuarios abiertos).

Para cada uno de los citados grupos, se presentan dos casos que sintetizan el comportamiento de los procesos observados en las experimentaciones resonantes. En primer lugar, se muestran aquellos casos que mantienen una geometría constante (tanto para un puerto como para los dos puertos abiertos), haciendo variar la altura de la onda incidente con los tres valores empleados en laboratorio de alta, media y baja energía, $H_1=0.05\text{m}$, $H_2=0.025\text{m}$, y $H_3=0.01\text{m}$, respectivamente. En segundo lugar se muestran los casos para cuando se conserva constante la altura de onda incidente en $H=0.025\text{m}$, y se hacen variar las longitudes de los puertos resonantes para 1m, 3m y 5m para uno y dos puertos abiertos.

Mantener constante las geometrías portuarias y hacer variar las características de la onda incidente, permite la observación de las características no lineales que ocurren dentro de los procesos asociados a la resonancia portuaria, mientras que hacer variar las longitudes portuarias en el caso de existir dos puertos abiertos, permite la visualización

de los efectos de acoplamiento observados durante las experimentaciones en laboratorio, y verificar así la calidad de los datos que el modelo numérico ofrece.

Para ello, se comparan los registros temporales de superficie libre obtenidas numéricamente con los datos de laboratorio para el primer grupo de puertos resonantes trabajando en solitario; se presentan los espectros obtenidos con la técnica wavelet y con la técnica tradicional FFT, además de un ejemplo de las posibles visualizaciones de la superficie libre bidimensional que el modelo numérico es capaz de ofrecer. Este análisis se repite para el conjunto de casos propuestos para el segundo grupo de dos puertos resonantes trabajando conjuntamente.

Cabe mencionar que, salvo pequeñas excepciones y con el fin de reducir el material gráfico, las comparaciones presentadas en este apartado, se limitan a mostrar los resultados en el sensor 18 para el primer canal, y en el sensor 15 para el segundo canal, puntos donde se considera a priori que la respuesta resonantes va a ser máxima.

a) Resonancia de un puerto con longitud constante de $l=1\text{m}$ y tres alturas de onda incidente variables, $H_1=0.01\text{m}$, $H_2=0.025\text{m}$, y $H_3=0.05\text{m}$

Se presenta, a continuación, los resultados comparativos para el caso de resonancia en un solo puerto abierto, de longitud constante e igual a 1m, sometido al forzamiento de ondas monocromáticas de igual periodo y diferente amplitud.

La figura 7.33 presenta el registro temporal de superficie libre para los casos 0103, 00102, y 0101 para el sensor 18 bajo la influencia de sobre-amplificaciones resonantes.

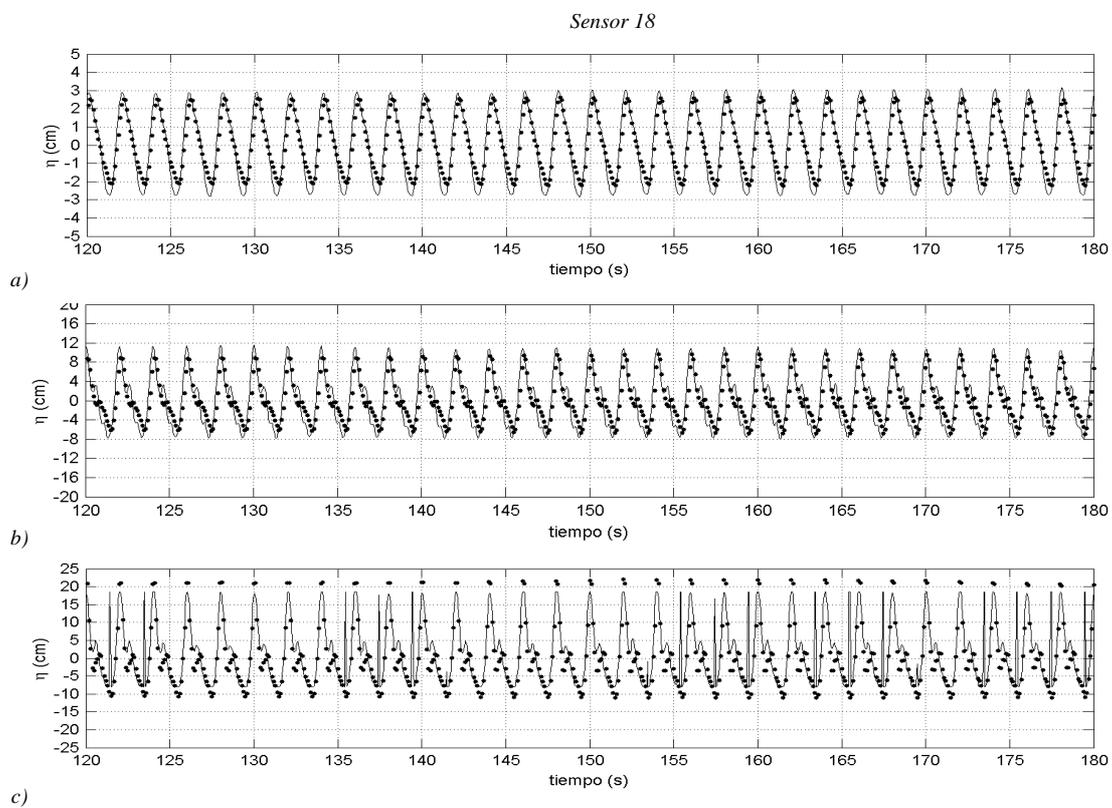


Figura 7.33 Comparación de los registros temporales de superficie de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del los casos a) 0103 $H=0.01\text{m}$, b) 0102 $H=0.025\text{m}$ y c) 0101 $H=0.05\text{m}$, $h=0.5\text{m}$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1).

Se observa que, conforme la altura de la onda monocromática incidente aumenta, se presentan mayores efectos no lineales que se manifiestan en la transferencia de energía entre componentes frecuenciales, observándose un aumento en las amplitudes

registradas para el segundo y tercer armónico a medida que aumenta la amplitud del forzamiento.

La figura 7.34 muestra, para el intervalo de tiempo correspondiente a los registros de superficie libre que aparecen en la figura 7.33, los espectros wavelet y los espectros de amplitudes obtenidos mediante la técnica tradicional FFT. Los segundos muestran como se distribuye la amplitud correspondiente a la energía presente por frecuencias, mientras que los espectros wavelet nos dan información de cómo la energía se distribuye por frecuencias y además de cómo evoluciona en el tiempo.

Los espectros wavelet obtenidos con los datos numéricos correspondientes a los casos 0103, 0102, y 0101 demuestran que el modelo numérico gestiona adecuadamente los cambios que se presentan en los efectos no lineales que sufre la onda sobre-amplificada por efectos resonantes para las tres diferentes alturas de onda incidente. La serie de superficie libre medida en laboratorio para el caso 0101 presenta unos picos aislados que se pueden considerar despreciables, ya que se deben a efectos de saturación por inundación del sensor utilizado en ese punto de medición en laboratorio.

El segundo armónico es sobre-estimado por el modelo numérico para el caso en que la onda incidente tiene una altura de $H=0.05\text{m}$, posiblemente debido a la incapacidad por parte del modelo numérico de modelar adecuadamente las fuertes disipaciones energéticas que se suceden en la bocana observadas en el laboratorio, ya que la fricción en el fondo es el único mecanismo disipador de energía que se utiliza en las simulaciones presentadas, y que para los casos de resonancia no lineal no logran disipar con suficiente efectividad los procesos turbulentos derivados de los efectos de chorro y vorticidad en la bocana.

Sensor 18

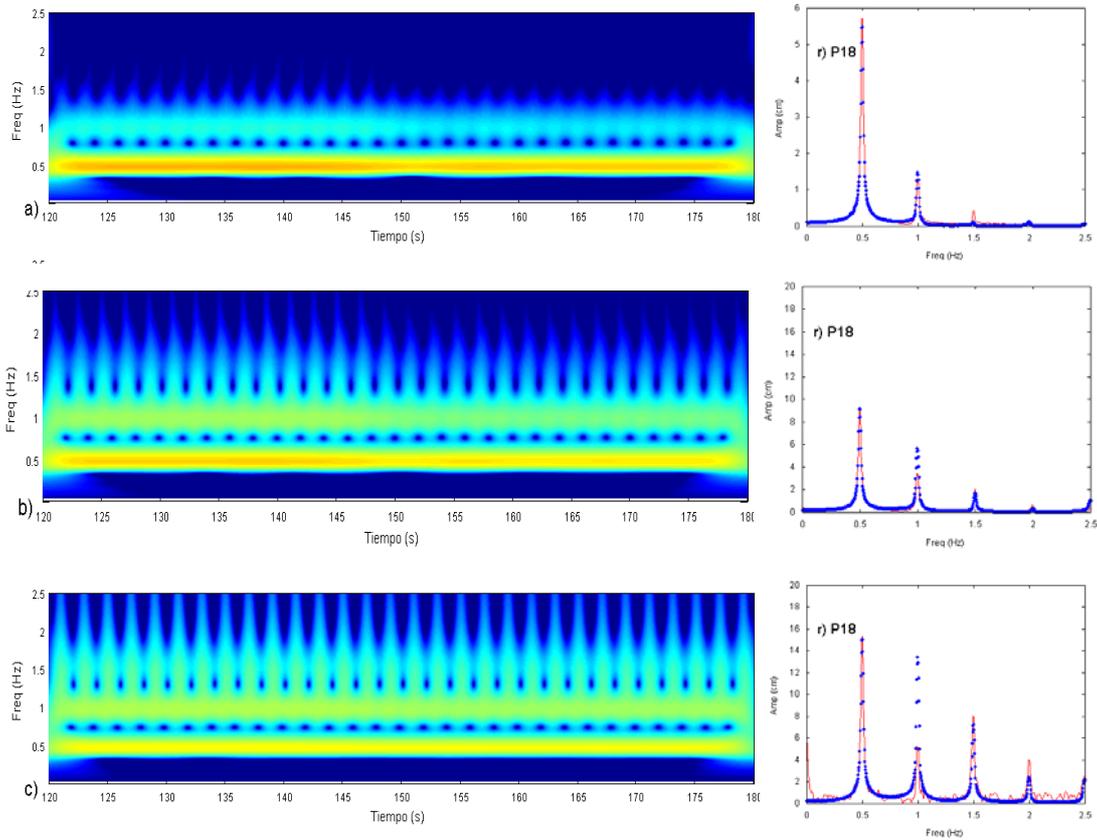


Figura 7.34 Comparación de los espectros wavelets y los espectros de amplitudes para los datos numéricos, del los casos a) 0103 $H=0.01m$, b) 0102 $H=0.025m$ y c) 0101 $H=0.05m$, , $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1).

Sin embargo, la tendencia de no linealidad que presentan los tres casos de simulación mostrados es clara, y el modelo lo simula con una buena correlación para el primero, segundo e inclusive para el tercer armónico. La técnica wavelet permite visualizar los paquetes energéticos que se trasladan hacia el segundo y tercer armónico, observándose que para éste ultimo los paquetes aparecen y desaparecen de forma intermitente coincidiendo con las cresta de la onda sobre-amplificada por efectos de la resonancia portuaria al fondo del canal portuario, mientras que para los tres casos de simulación mostrados, la energía del primer armónico permanece constante durante todo el tiempo de simulación mostrado.

b) Resonancia de un puerto con tres longitudes variables de $l_1=1\text{m}$, $l_2=3\text{m}$, y $l_3=5\text{m}$, utilizando una altura de onda incidente constante de $H=0.025\text{m}$.

En este apartado se analiza las características de un puerto resonante con longitud variable bajo un mismo forzamiento que se mantiene constante durante las tres simulaciones. Para validar los resultados del modelo numérico se comparan las series temporales de superficie libre en el laboratorio. Asimismo, se analiza las tendencias del carácter no lineal del fenómeno de resonancia al considerar diferentes geometrías portuarias.

En las figura 7.35 se observa que para los tres casos simulados con el modelo MANOLO, las alturas de onda alcanzadas al final del canal son de aproximadamente 16 cm, 20 cm y 18 cm, para los casos 0102, 0302, y 0501 respectivamente, con formas y perfiles de onda completamente diferentes entre sí.

El primer caso 0102, con una longitud portuaria de 1 m, presenta fuertes transferencias energéticas entre los primeros tres armónicos llegando a establecer una relación 2 a 1 entre los valores del primer y segundo armónico, y entre el segundo y tercer armónico. La onda es casi simétrica con respecto al nivel en reposo, con crestas y picos angostos que definen un perfil de onda aproximadamente triangular con fuertes asimetrías con respecto a su eje vertical. En el espectro wavelet, figura 7.36(a), correspondiente al caso simulado numéricamente 0102 se puede verificar que es el caso en el que la energía está presente en los tres armónicos durante todo el intervalo de tiempo considerado.

A pesar de que el caso anteriormente descrito, es el que tiene la energía más distribuida entre los diferente armónicos, es el caso 0302 con una longitud portuaria de 3m, el que presenta las mayores oscilaciones resonantes y las transferencias energéticas entre frecuencias más acusadas, debido a que el segundo armónico encuentra su modo natural de oscilación para esa longitud portuaria, haciendo que la onda resonante tenga una mayor influencia de este segundo armónico en comparación con el caso 0102. La onda adopta una forma achatada en los senos y estrecha en las crestas, con una fuerte asimetría con respecto al nivel en reposo, pero en este caso con cierta simetría con respecto a su eje vertical.

Para el caso 0501, se tiene que el primer armónico es el más amplificado de los tres casos, el segundo armónico conserva un valor menor al observado en el caso 0302, y el tercer armónico se mantiene con una energía baja. La onda resultante es bastante simétrica con respecto al nivel en reposo y también con respecto al eje vertical del perfil de la onda. Esta geometría se debe fundamentalmente al peso relativo que tiene el primer armónico frente al segundo y al tercero, haciendo que la onda se asemeje a un perfil senoidal que alcanza a deformarse por la influencia, aunque pequeña, de los dos armónicos restantes.

El modelo numérico sigue fielmente las formas, magnitudes y fases de las tres ondas resonantes mostradas, adaptándose perfectamente a las características no lineales y de transferencia energética entre componentes frecuenciales de cada caso particular.

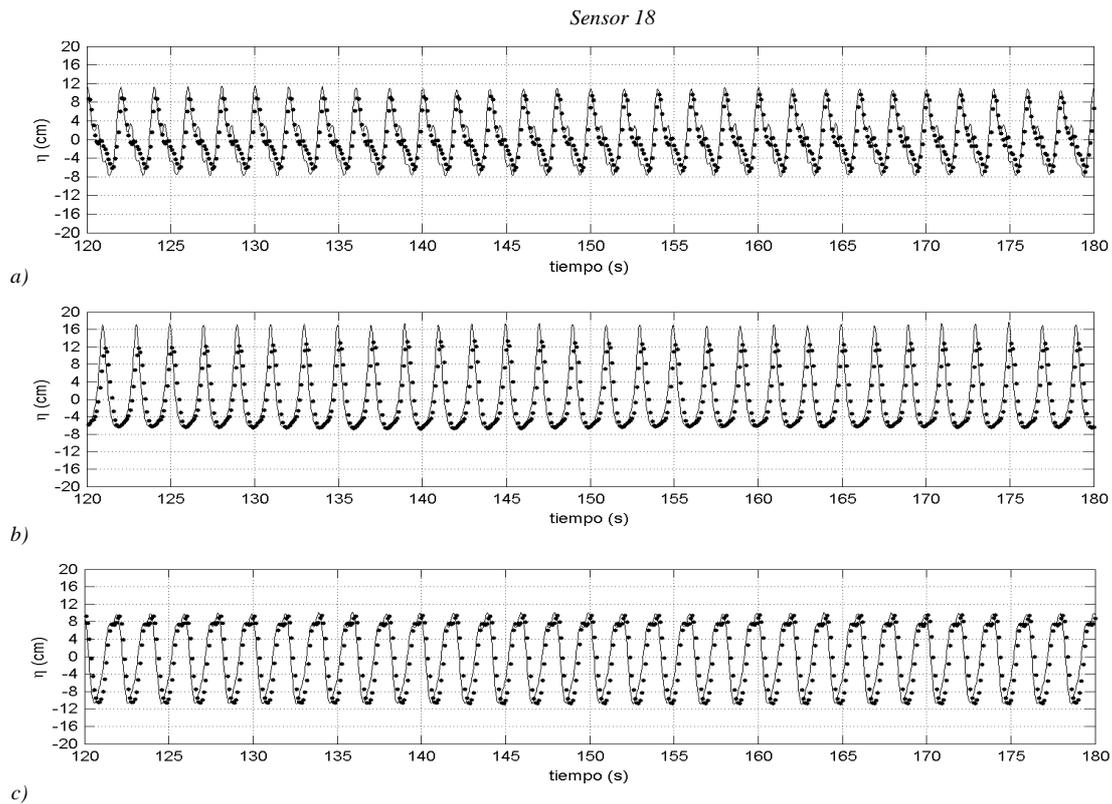


Figura 7.35 Comparación de los registros temporales de superficie de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del los casos a) 0102 $H=0.025m$, b) 0302 $H=0.025m$ y c) 0501 $H=0.025m$, $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1).

La figura 7.36, presenta las representaciones espectrales wavelet, además de los espectros de amplitudes obtenidas con la técnica FFT, mostrando que el modelo numérico realiza muy bien las transferencias de energía entre frecuencias y que es capaz de representar adecuadamente los paquetes de energía que el segundo y tercer armónico contienen de forma intermitente, en ocasiones en fase para ambos armónicos (casos 0102 y 0302), y en otras desfasados 90° (caso 0501).

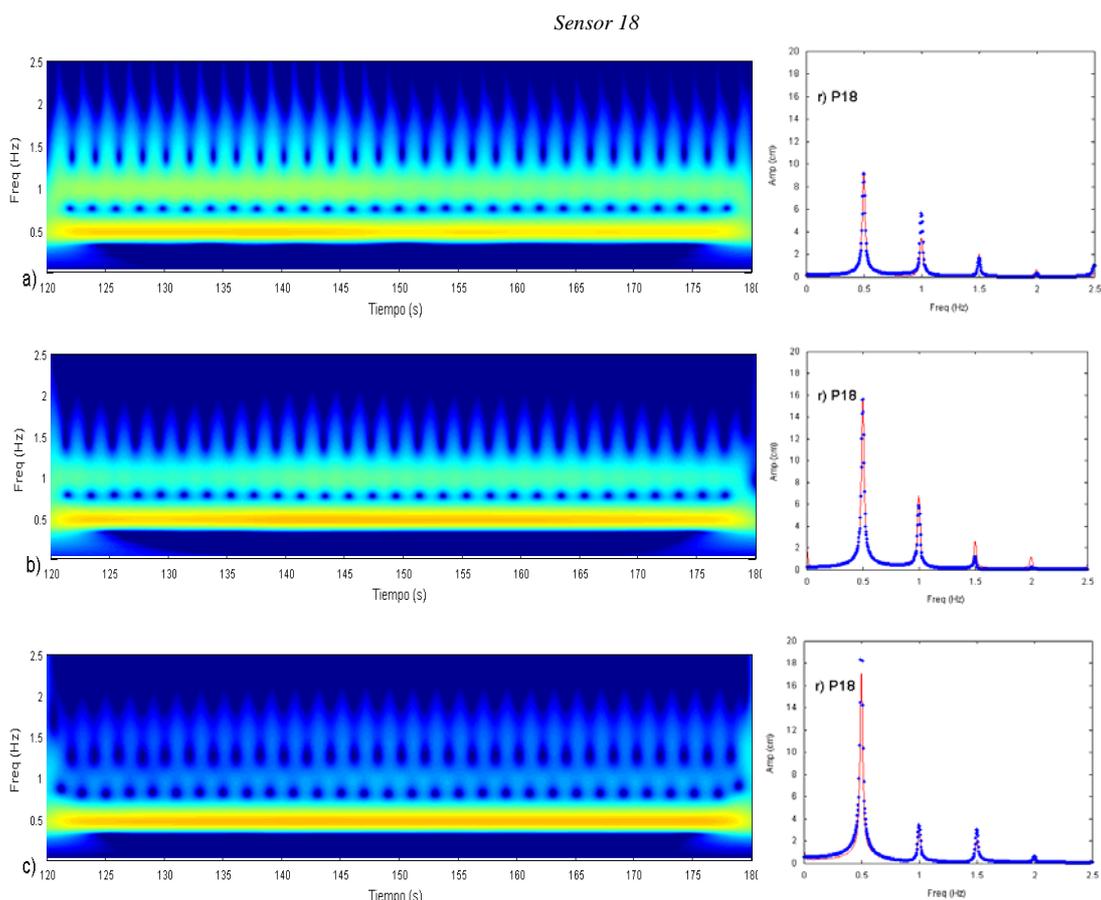


Figura 7.36 Comparación de los espectros wavelets y los espectros de amplitudes para los datos numéricos, del los casos a) 0102 $H=0.025m$, b) 0302 $H=0.025m$ y c) 0501 $H=0.025m$, $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1).

La figura 7.37 muestra la evolución de los primeros cuatro armónicos obtenidos con la técnica FFT a lo largo de la línea media del puerto del caso 0501, (5 m de longitud, $h=0.5$ m, $H=0.025m$, $T=2$ s), con el fin de exponer de manera gráfica la transferencia energética entre armónicos y su evolución dentro del puerto, y cómo éstos se ven afectados por las oscilaciones resonantes.

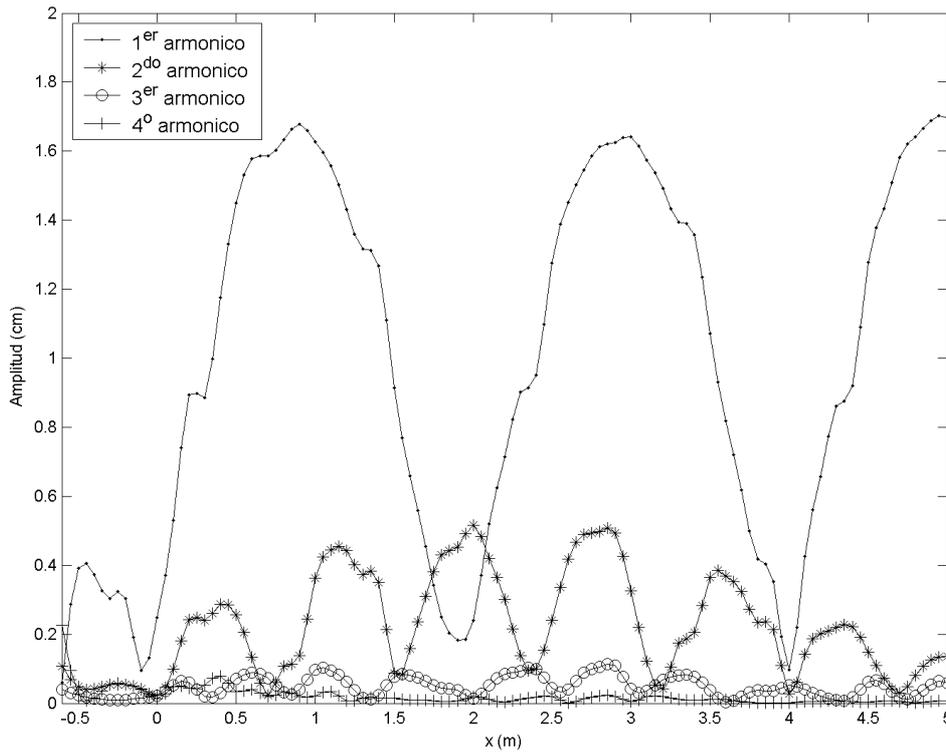


Figura 7.37 Evolución espacial de los primeros cuatro armónicos dentro del puerto para el caso 0501.

En la figura 7.37, se observa claramente la transformación que sufre el primer armónico al penetrar hacia el puerto desde el punto de la bocana $x=0$ m, hasta el final del canal $x=5$ m. El primer armónico mantiene una amplitud de aproximadamente 0.4 cm fuera del canal, presentando un nodo justo en el punto de la bocana para posteriormente evolucionar hasta alcanzar tres antinodos con una amplitud de 1.6.

Las transformaciones más significativas se pueden observar en los valores de la amplitud espectral del segundo armónico. En la zona anterior a la bocana, el segundo armónico tiene una energía menor que 0.05 cm, en contraste con los valores encontrados dentro del puerto de alrededor de 0.4 cm, por efectos de transferencia no lineal entre el primero y el segundo armónico.

Este comportamiento se observa de igual forma en los valores de amplitud espectral observados en el tercer armónico, mostrando las máximas sobre-amplificaciones en la zona media del canal portuario. Los valores para el cuarto armónico son prácticamente despreciables.

Con este ejemplo queda demostrada la versatilidad que ofrece el modelo numérico MANOLO, para el estudio del fenómeno de la resonancia portuaria no lineal, permitiendo la observación temporal y espacial de las características de agitación para diversas configuraciones portuarias y diversos elementos forzadores, sin verse limitada por las mediciones que se realizaron en laboratorio, al poder ofrecer una gran cantidad de información adicional a partir de los resultados numéricos.

Finalmente, dentro de este primer grupo de comparaciones con un solo puerto, se presentan en la figura 7.38 las representaciones bidimensionales de superficie libre para seis instantes de tiempo seleccionados, y para las cinco longitudes portuarias diseñadas en el laboratorio y simuladas numéricamente.

Los puertos con longitudes de 1m, 2m y 3m, presentan características resonantes completamente diferentes entre si, observándose fuertes oscilaciones no lineales para el puerto de 5m de longitud, que por su longitud logra incluir dos nodos a lo largo de su longitud, mientras que el puerto de 1m sigue otros patrones de oscilación con la posición del nodo en la bocana.

Los puertos no resonantes (de 2m y 4m) oscilan ordenadamente, alcanzando valores de agitación dentro de las dársenas equivalente a una onda estacionaria lineal.

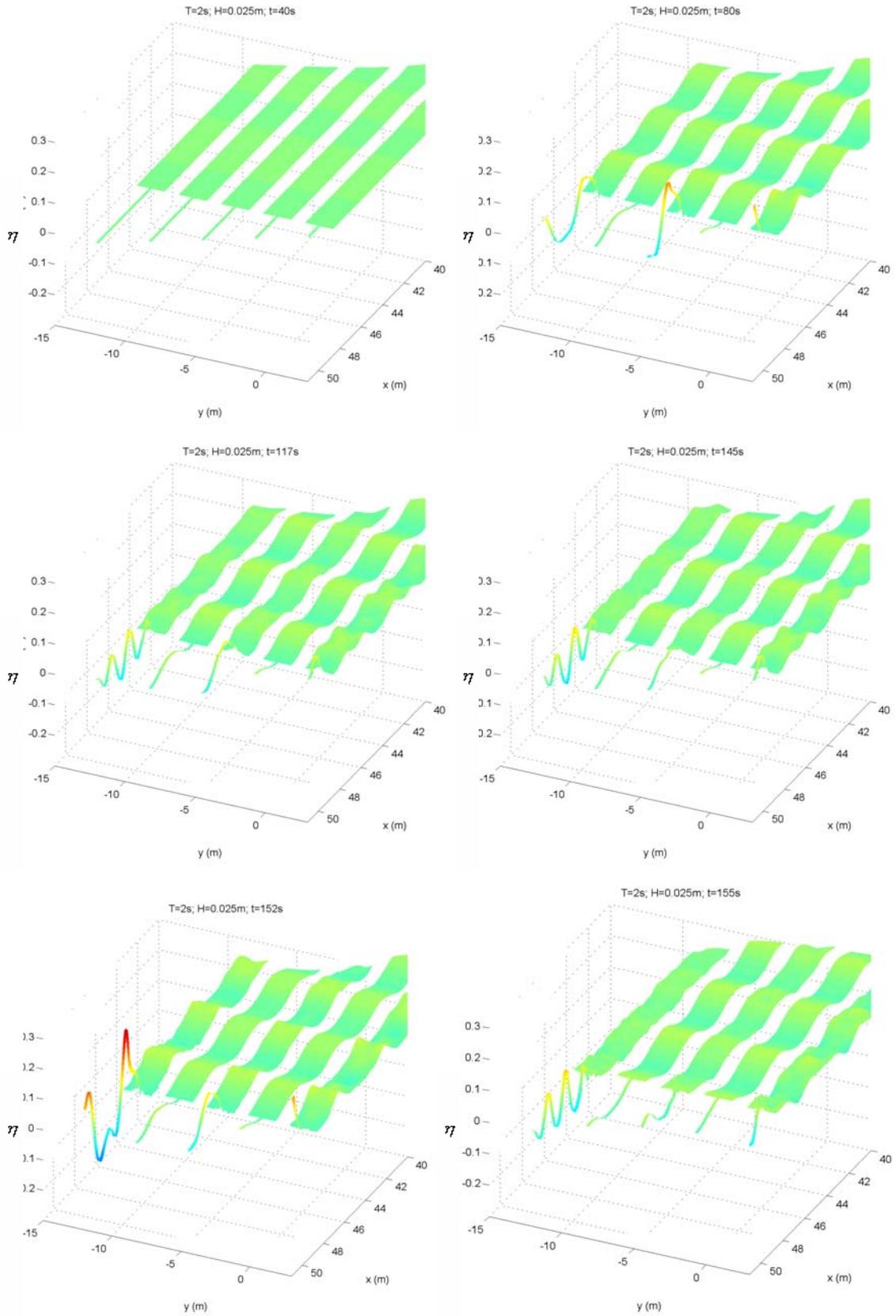


Figura 7.38 Superficie libre para un puerto trabajando en solitario con 5 diferentes longitudes 5m, 4m, 3m, 2m y 1 m, para diferentes instantes de tiempo, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$.

- c) **Resonancia de dos puertos acoplados con la misma longitud $l_1=l_2=3\text{m}$, constante y tres alturas de onda incidente variable, $H_1=0.01\text{m}$, $H_2=0.025\text{m}$, y $H_3=0.05\text{m}$**

Dentro del segundo grupo de simulaciones resonantes descrito al inicio de este apartado, se presenta, a continuación, los casos numéricos que comparan los diferentes efectos de oscilación para un sistema de dos puertos rectangulares adyacentes, bajo condiciones resonantes, no lineales y con efectos de acoplamiento.

En este primer caso se muestran tres simulaciones realizadas conservando una misma geometría con los dos canales portuarios abiertos, ambos de 3 metros de longitud, y actuando bajo el forzamiento de tres ondas monocromáticas con un periodo constante de $T=2\text{s}$, y tres alturas de onda incidentes $H=0.01\text{m}$, $H=0.025\text{m}$, y $H=0.05\text{m}$, sobre un fondo constante $h=0.5\text{m}$.

La figura 7.39, muestra los registros temporales de superficie libre obtenidos numéricamente para el punto situado al fondo del canal portuario 1 (sensor 18), y al fondo del canal portuario 2 (sensor 15). Los casos realizados numéricamente se comparan con las mediciones realizadas en laboratorio de los casos 1701, 1702, y 1703 para los mismos puntos de control.

Se observa una muy buena correlación para los tres casos simulados numéricamente, observándose que las oscilaciones resonantes obtenidas en el sensor 18, alcanzan valores de más del doble de las oscilaciones del sensor 15, independientemente del valor de la onda monocromática incidente. Los valores simulados muestran las diferencias existentes entre una resonancia lineal (caso 1701) y una resonancia no lineal (caso 1703), a través de la visualización directa de las ondas individuales en los registros numéricos de superficie libre dentro de los dos puertos, así como en la observación de los espectros de amplitudes y espectros wavelet mostrados en las figuras 7.40 y 7.41.

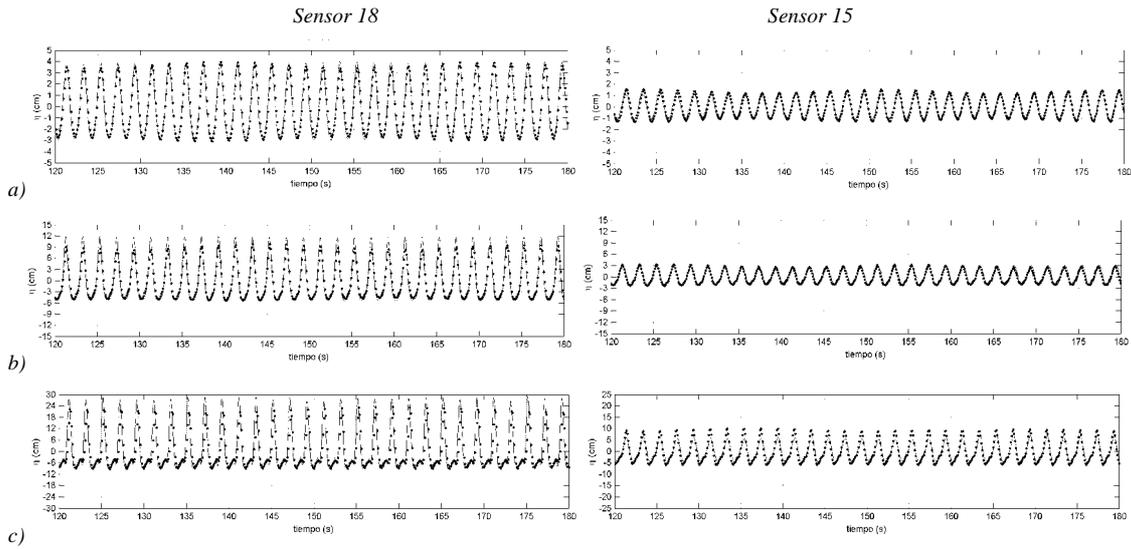


Figura 7.39 Comparación de los registros temporales de superficie de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del los casos a) 1701 $H=0.01m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 1703 $H=0.05m$, $h=0.5m$. Sensores 15 (al final del canal portuario 2), y 18 (al final del canal portuario 1).

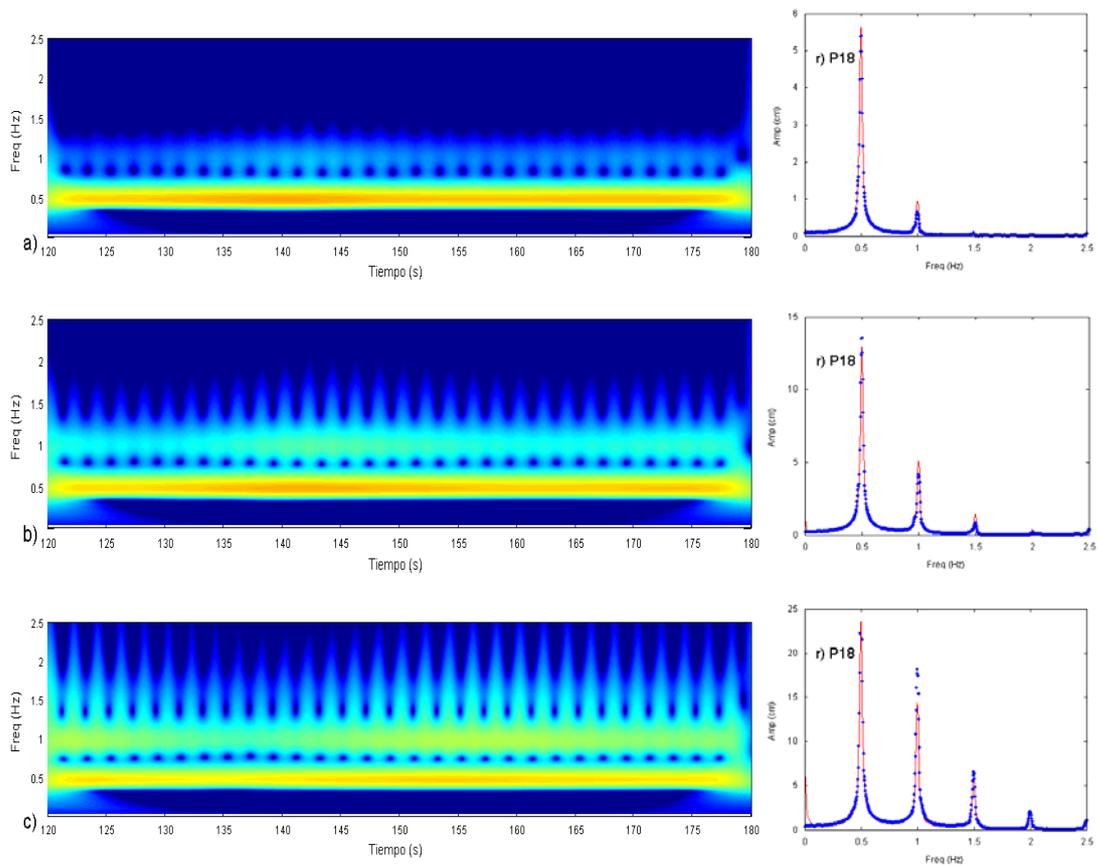


Figura 7.40 Comparación de los espectros wavelets y espectros de amplitudes para los datos numéricos, del los casos a) 1701 $H=0.01m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 1703 $H=0.05m$, $h=0.5m$. Sensor 18 (al final del canal portuario 1).

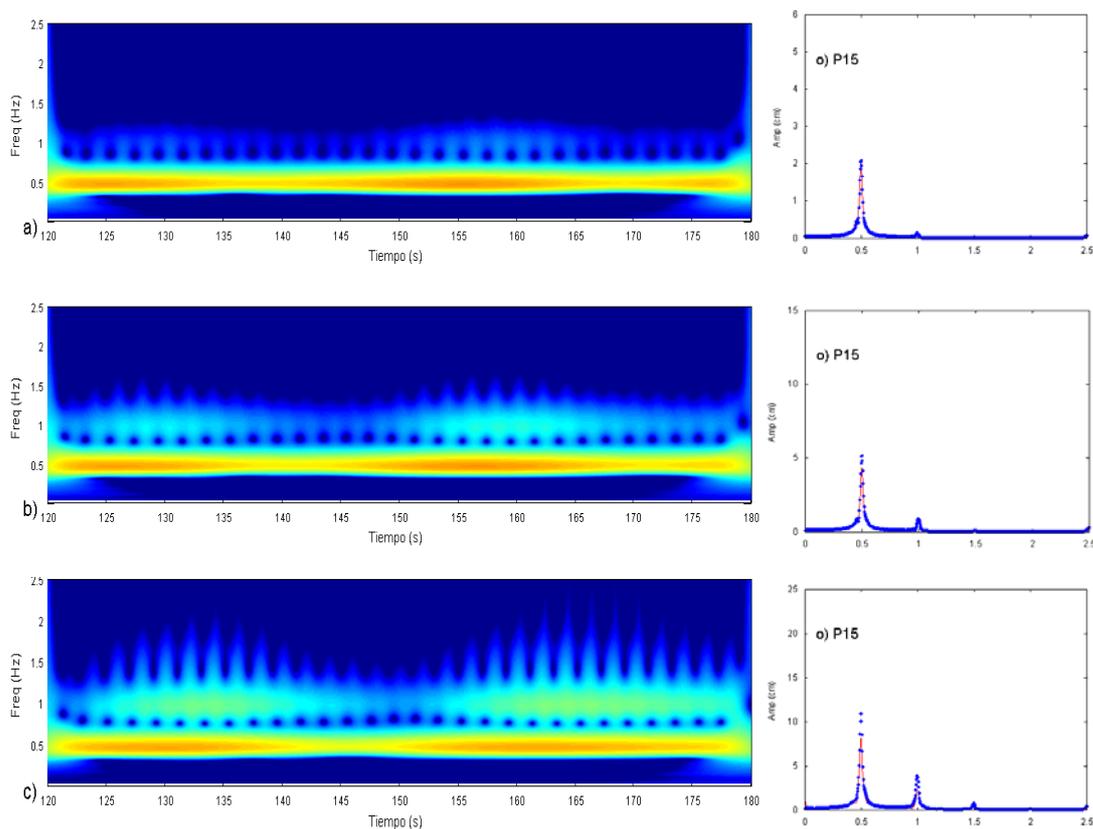


Figura 7.41 Comparación de los espectros wavelets y espectros de amplitudes para los datos numéricos, del los casos a) 1701 $H=0.01m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 1703 $H=0.05m$, $h=0.5m$.

Sensor 15 (al final del canal portuario 2).

Las representaciones wavelet obtenidas con las series temporales numéricas en los dos puntos de control al final de los canales portuarios, muestran una interesante tendencia hacia la no linealidad conforme aumenta el valor de la altura de onda incidente, situación coincidente con los casos anteriormente mostrados de un puerto resonante trabajando en solitario, pero en este caso influenciados por la presencia de una segunda dársena que además de presentar oscilaciones resonantes menores, actúa como un cuerpo de agua que amortigua, e impone un nuevo sistema oscilatorio dentro y fuera de las dársenas portuarias.

La existencia de la segunda dársena situada asimétricamente con respecto al eje medio del canal de oleaje, hace que bajo condiciones resonantes, los efectos observados de chorro en la bocana y vorticidad se propaguen asimétricamente, derivando en la generación de una onda transversal que se mueve a lo ancho de los contornos del canal de oleaje, y que en ocasiones logra penetrar a través de la bocana del segundo puerto.

Estos complejos patrones de oscilación son reproducidos adecuadamente por el modelo numérico, mostrando que la existencia de la segunda bocana resonante implica importantes cambios no solo en las amplificaciones resonantes alcanzadas dentro del canal, si no en las características de oscilación en la bocana, y en la zona de radiación exterior al puerto. Situación que se ve reflejada perfectamente en las figuras 7.40 y 7.41 que muestran que los paquetes de energía transferidos para el segundo y tercer armónico se manifiestan cíclicamente con un periodo de aproximadamente 30s, impuesto por la onda transversal exterior y que fomenta un desfase entre las oscilaciones de ambos puertos.

Es indudable que un fenómeno resonante de estas características sólo se puede evaluar numéricamente con un modelo que contemple la bidimensionalidad, dispersividad, no linealidad, acoplamiento, efectos de disipación, y sus interacciones a lo largo del tiempo tal y como lo plantea el modelo MANOLO.

d) Resonancia de dos puertos acoplados con tres longitudes variables de $l_1=1\text{m}$, $l_2=3\text{m}$, y $l_3=5\text{m}$, y una altura de onda incidente de $H=0.025\text{m}$

Finalmente, dentro de la serie de comparaciones propuestas para la validación del modelo numérico MANOLO, como herramienta de análisis del fenómeno de resonancia portuaria, se muestran las siguientes comparaciones que consisten en un puerto que adopta tres longitudes variables (ambos puertos conservan la misma longitud entre si), bajo una onda incidente monocromática de características constantes.

La figura 7.42 muestra los registros temporales de superficie libre para lo casos 2502, 1702 y 0902, para los dos puntos situados al final de los dos puertos rectangulares, donde cada longitud propuesta corresponde al primer, segundo y tercer armónico.

Se observa en la figura que el comportamiento de las oscilaciones es similar al observado en la figura 7.45 donde cada una de las tres oscilaciones mostradas conservan características bien diferenciadas entre si, dependiendo de la magnitud en las transferencias energéticas que experimenten el segundo y tercer armónico.

Abrir el segundo puerto adyacente implica pasar de un problema de resonancia cuasi-unidimensional a un sistema completamente bidimensional, con marcados patrones de oscilación hacia múltiples direcciones.

Los registros numéricos de superficie libre correspondientes al sensor 15, a diferencia de los mostrados en la figura 7.49, adoptan aproximadamente las mismas características geométricas de aquellos medidos en el sensor 18 (puerto 1), conservando sus formas en el perfil, pero manifestándose con una menor energía oscilatoria, con amplificaciones resonantes que no alcanzan a superar la mitad de los registrados en el sensor 18.

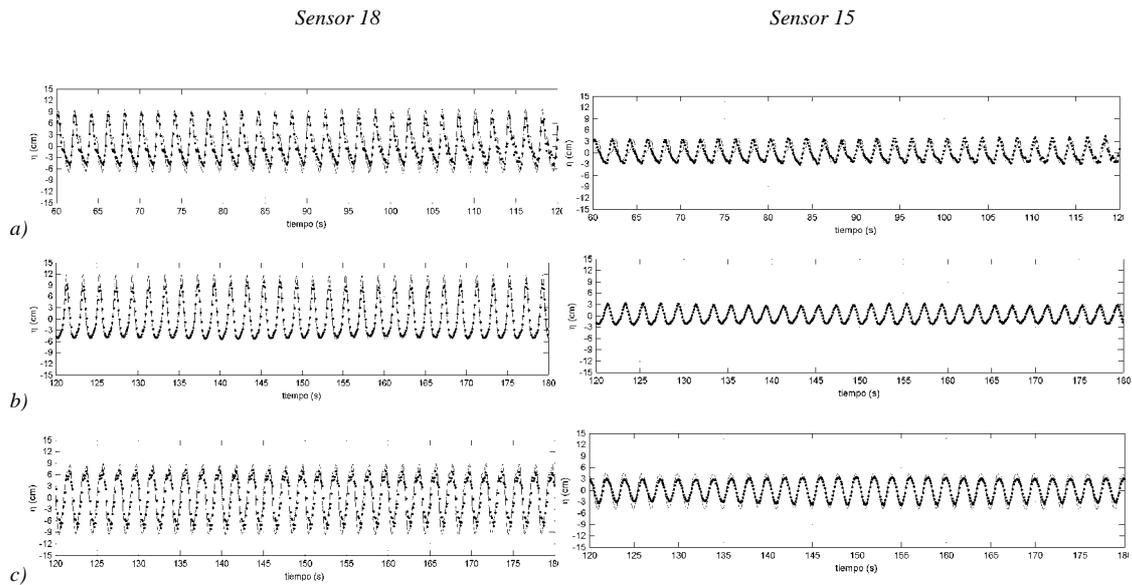


Figura 7.42 Comparación de los registros temporales de superficie de los datos numéricos (puntos) vs. datos de laboratorio (línea continua), del los casos a) 2502 $H=0.025m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 0902 $H=0.025m$, $h=0.5m$. Sensores 15 (al final del canal portuario 2), y 18 (al final del canal portuario 1).

El decaimiento de las oscilaciones resonantes dentro del segundo puerto (sensor 2), se deben en mayor medida a la presencia de una onda transversal que para cada uno de los tres casos se manifiesta de forma diferente, dependiendo de las características e intensidad de los efectos resonantes acoplados entre los dos puertos adyacentes.

Las figuras 7.43 y 7.44 representan los espectros de energía obtenidos con la técnica wavelet para el periodo de tiempo seleccionado, además de presentar los espectros medios de amplitud calculados con la técnica FFT. Se observa que el caso más no lineal (caso 2502) presenta los máximos valores de trasferencia entre los tres primeros armónicos prácticamente a lo largo de toda la simulación numérica, proponiendo un comportamiento de agitación y trasferencia energética similar entre las dos bocanas.

El caso 1702 comienza a presentar modulaciones en los paquetes energéticos del segundo armónico para la primera bocana (sensor 18), que coinciden perfectamente con los periodos de modulación para la segunda bocana, repartiendo el total de la energía incidente en los dos primeros armónicos hacia ambas bocanas.

Prácticamente, la totalidad de la energía incidente se conserva en el primer armónico para el caso 0902, el cual muestra las máximas amplificaciones resonantes en ambos

canales portuarios, presentando únicamente la existencia de paquetes de baja energía dentro de los primeros segundos de la simulación y tendiendo éstos a disminuir de intensidad paulatinamente en el tiempo.

Sensor 18

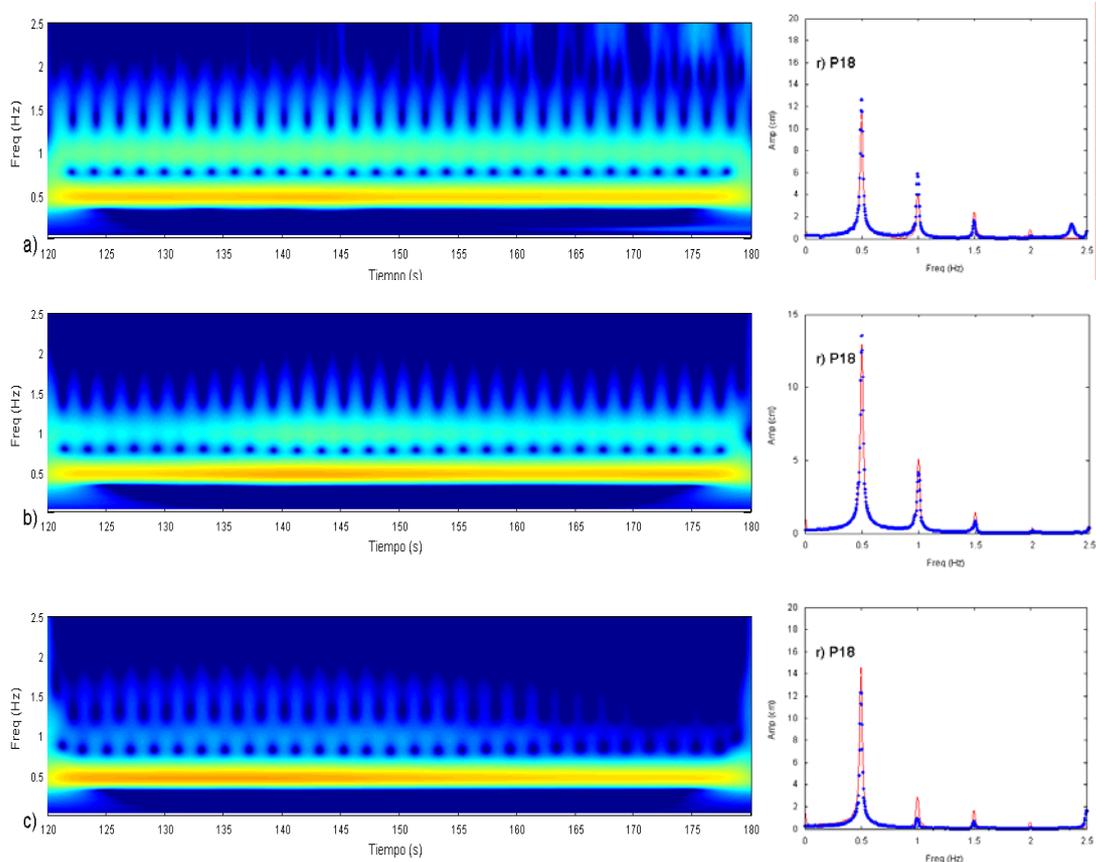


Figura 7.43 Comparación de los espectros wavelets y espectros de amplitudes para los datos numéricos, casos a) 2502 $H=0.025m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 0902 $H=0.025m$, $h=0.5m$.

Sensor 18 (al final del canal portuario 1).

Sensor 15

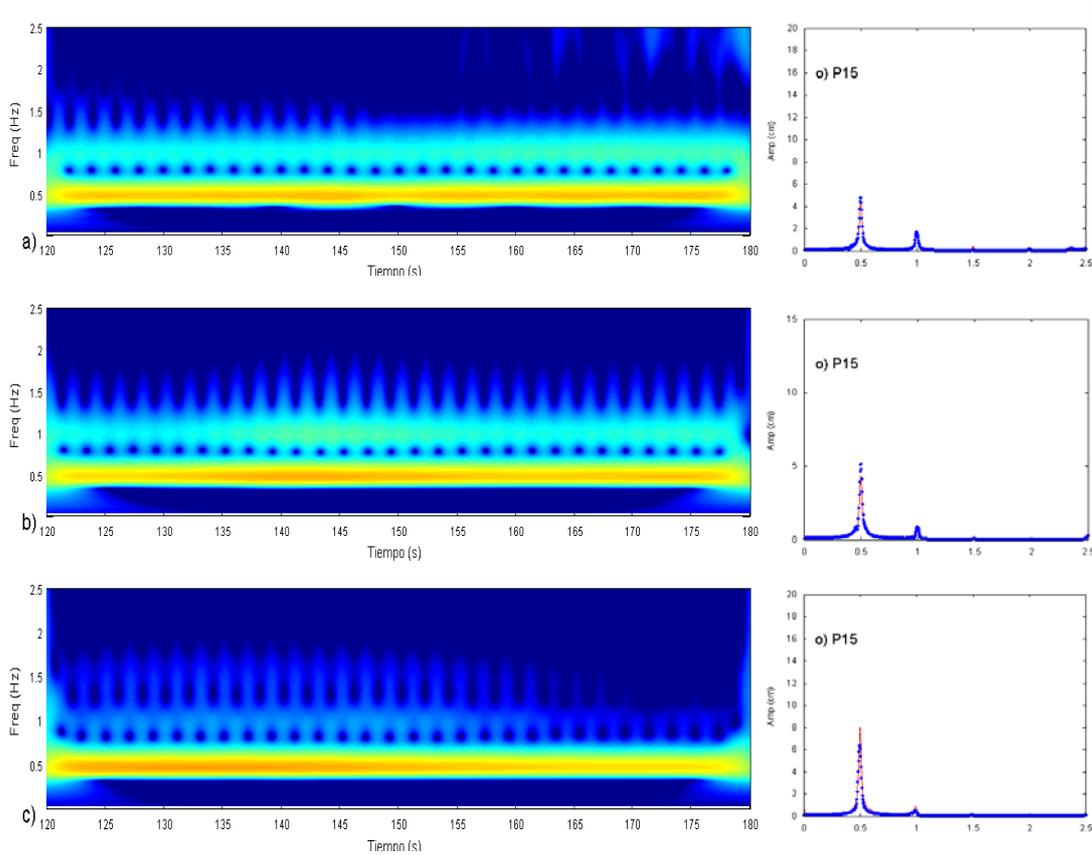


Figura 7.44 Comparación de los espectros wavelets y espectros de amplitudes para los datos numéricos, casos a) 2502 $H=0.025m$, b) 1702 $H=0.025m$ y c) 0902 $H=0.025m$, $h=0.5m$. Sensor 15 (al final del canal portuario 2).

Los casos discutidos anteriormente, permiten verificar que el modelo numérico MANOLO sigue adecuadamente la tendencia de comportamiento observado en laboratorio para cuando se tiene un sistema de dos puertos rectangulares acoplados que varían en su longitud bajo los efectos de un mismo elemento forzador, con características constantes.

En las figuras 7.45 y 7.46, se observan las transformaciones que sufren el primer, segundo, tercer y cuarto armónico a lo largo de los dos canales portuarios adyacentes del caso 1702.

Los patrones de amplitudes entre los dos puertos son similares, encontrándose que el primer puerto presenta valores de aproximadamente el doble con respecto al segundo puerto.

El primer armónico contiene las mayores amplitudes espectrales, presentando un nodo en la bocana (punto $x=0$) y dos antinodos (en $x=1$ y $x=3$). Las amplificaciones resonantes que experimenta el primer armónico se observan claramente dentro de ambos puertos, presentando valores de hasta 2 cm con respecto a los aproximadamente 0.7 cm de amplitud del primer armónico en la zona exterior al primer puerto.

El segundo armónico presenta importantes amplificaciones dentro de ambas dársenas, considerando que en la zona exterior a éstas su energía es cercana a cero. Las patrones de oscilación del segundo armónico son menos simétricos a los mostrados en la figura 7.37 (para un puerto trabajando en solitario), mostrando una tendencia creciente hacia el final de ambos canales. Esta irregularidad en las oscilaciones se debe a la interacción entre ambas dársenas adyacentes, y a las oscilaciones asimétricas que se establecen en la exterior de los puertos, así como a los fuertes efectos turbulentos que se han observado en ambas bocanas.

El tercer y cuarto armónico prácticamente pasan desapercibidos a lo largo de los dos canales portuarios, presentando únicamente amplitudes de aproximadamente 0.7 cm en los primeros centímetros en el interior de primer puerto, que reflejan parte de la inestabilidad numérica que presenta el modelo en esa zona por presencia de fuertes efectos turbulentos en la bocana que generan ondas residuales de pequeña amplitud.

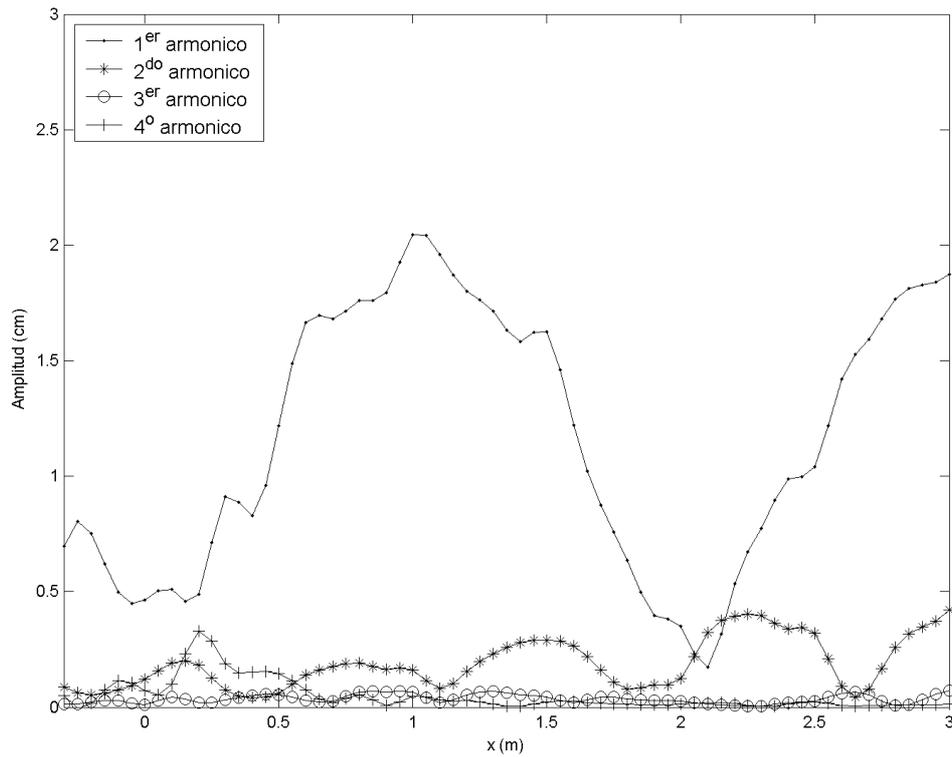


Figura 7.45 Evolución espacial de los primeros cuatro armónicos dentro del primer puerto para el caso 1701.

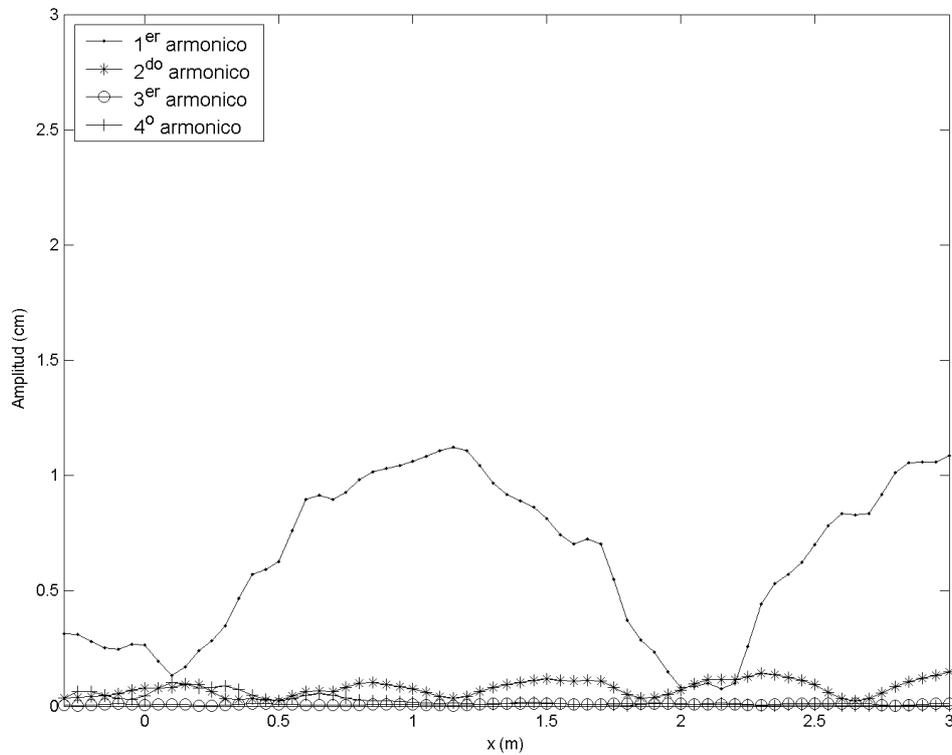


Figura 7.46 Evolución espacial de los primeros cuatro armónicos dentro del segundo puerto para el caso 1701.

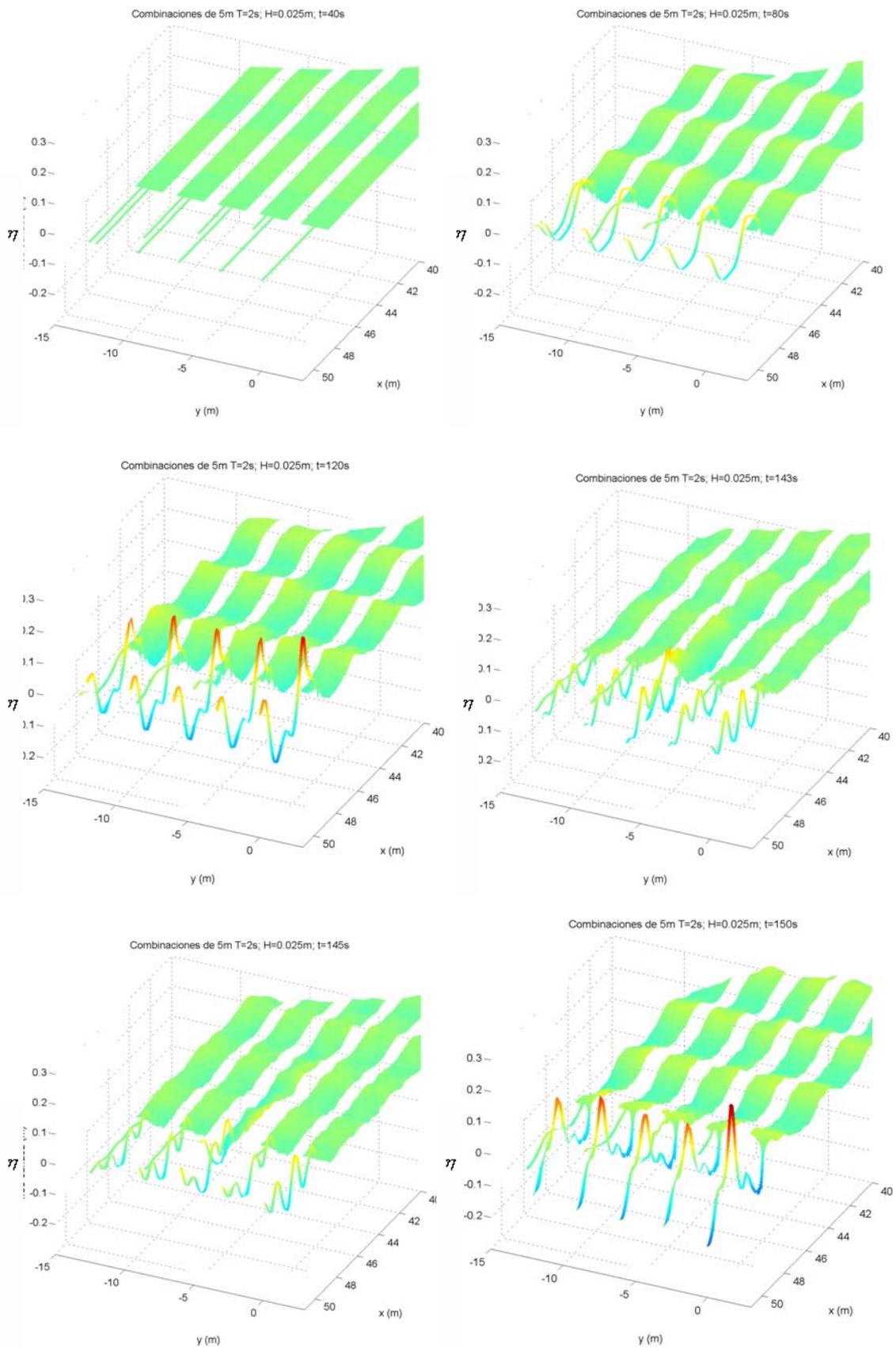


Figura 7.47 Superficie libre para un puerto resonante de 5m y sus correspondientes puertos acoplados de 4m, 3m, 2m y 1 m, para diferentes instantes de tiempo, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$.

Para finalizar, se presenta un ejemplo de la representación de superficie libre bidimensional para cinco casos simulados con dos puertos adyacentes en seis instantes de tiempo diferentes, figura 7.47.

El primer puerto presenta características resonantes dentro de sus 5m de longitud, mientras que los puertos adyacentes tienen 1.25m, 2.5m, 3.75m y 5m respectivamente. Se puede observar cómo los efectos resonantes no lineales del puerto trabajando en solitario, comienzan a verse modificados por la presencia de los puertos adyacentes, presentando cada uno de ellos unas condiciones de agitación únicas y particulares, que obedecen a las transformaciones que se suceden a lo largo del tiempo, dentro y fuera de las bocanas portuarias, dependiendo del grado de energía de agitación, de los efectos turbulentos en las bocanas portuarias, de la longitud del puerto adyacente, y a la posible generación de ondas transversales con mayor o menor grado de simetría.

La complejidad de los procesos simulados por el modelo numérico permite concluir que la ingeniería de puertos cuenta con una valiosa herramienta para el estudio integral de sistemas portuarios resonantes.

Además, la herramienta numérica propuesta en este capítulo es susceptible de ser utilizada bajo condiciones de agitación resonante reales, con la utilización de batimetrías reales y elementos forzadores tomados directamente de medidas realizadas en campo, situación que va a ser acometida en el capítulo siguiente.

7.3.5 Simulaciones adicionales

Este apartado se encarga de mostrar la serie de ventajas adicionales que el modelo numérico MANOLO es capaz de ofrecer, sobre las limitaciones físicas que imponen las experimentaciones en laboratorio, demostrando así que el modelo numérico se puede considerar como una herramienta apta para simular una variada gama de situaciones resonantes dentro de contornos portuarios.

Se quiere demostrar que el modelo numérico una vez validado, se puede considerar como un laboratorio numérico que permite obtener resultados adecuados trabajando sobre geometrías alternativas a las originalmente presentadas en las experimentaciones físicas, que sobrepasen las limitaciones impuestas originalmente por el modelo físico (paredes laterales del canal), obteniendo así nuevas series numéricas para casos complementarios a los generados en laboratorio, no solo para los puntos previamente establecidos, si no para todos los puntos dentro del dominio.

En primer lugar se muestran los resultados puramente numéricos para la configuración geométrica correspondiente al caso 1702 modelado en laboratorio (dos puertos resonantes de 3 m cada uno).

Adicionalmente, en este apartado se muestran los registros temporales de velocidad obtenidos numéricamente, que nos proveen información sobre los ordenes de magnitud y tendencias cualitativas de comportamiento de la velocidad del flujo resultante de la resonancia dentro de las dársenas portuarias.

a) Comparación de la resonancia para dos puertos resonantes sin la presencia de las paredes del canal de oleaje experimental, para una altura de onda incidente constante, $H=0.025\text{m}$

La configuración que se muestra a continuación, propone un sistema de puertos acoplados geoméricamente, en paralelo, sin la influencia de las paredes laterales del canal de oleaje utilizado durante las simulaciones experimentales en laboratorio, con la finalidad de observar las diferencias en las series temporales de superficie libre observadas entre ambos casos (sin paredes laterales y con paredes laterales), además de visualizar los posibles efectos de acoplamiento geométrico entre dársenas bajo diferentes sistemas de oscilación en la zona de radiación portuaria.

La figura 7.48 muestra un ejemplo del dominio numérico generado para el caso 1702 sin las paredes exteriores del canal de oleaje, mostrando la disposición de los nodos y elementos triangulares de la malla en elementos finitos.

El dominio numérico consta de los puertos rectangulares y paralelos conectados a una zona de radiación completamente abierta, simulada por una corona de absorción de energía hacia el exterior de 6 m de longitud, con el objetivo de que las ondas reflejadas e irradiadas desde los contornos portuarios, sean absorbidas hacia el exterior y no se vuelvan a propagar hacia el interior del dominio.

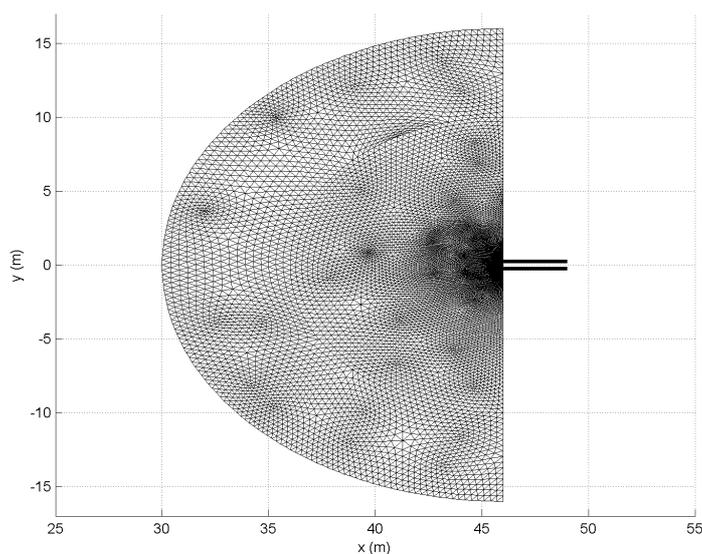


Figura 7.48 Malla en elementos finitos triangulares para el caso 1702 sin paredes del canal de oleaje experimental.

Se presenta, a continuación, los resultados comparativos para el caso de resonancia en un sistema de dos puertos, cada uno con una longitud igual de $l=3\text{m}$, bajo la incidencia de una onda monocromática constante de $H=0.025\text{m}$.

Las figuras 7.49 a 7.51 presentan los registros temporales de superficie libre para el caso 1702 con y sin paredes, para los puntos de medición dentro del dominio numérico de la zona de radiación (sensores 4 a 12), y zona portuaria (sensores 13 a 18).

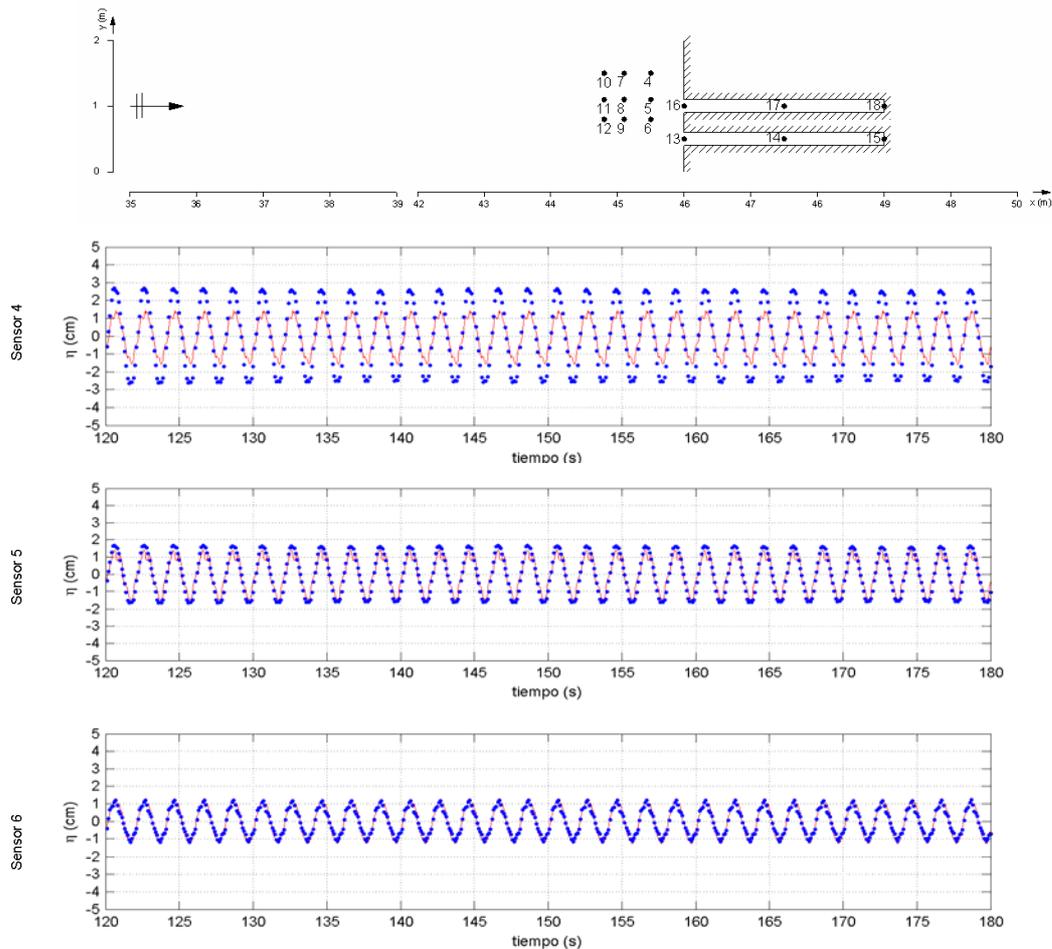


Figura 7.49 Comparación de los datos numéricos para el caso con paredes (puntos azules) vs. datos numéricos para el caso con paredes (línea continua roja), del caso 1702, $H=0.025\text{m}$, $T=2\text{s}$, $h=0.5\text{m}$.

$$\mu = 0.123 ; \varepsilon = 0.00615 ; \delta = 0.05 . \text{ Sensores 4 a 6.}$$

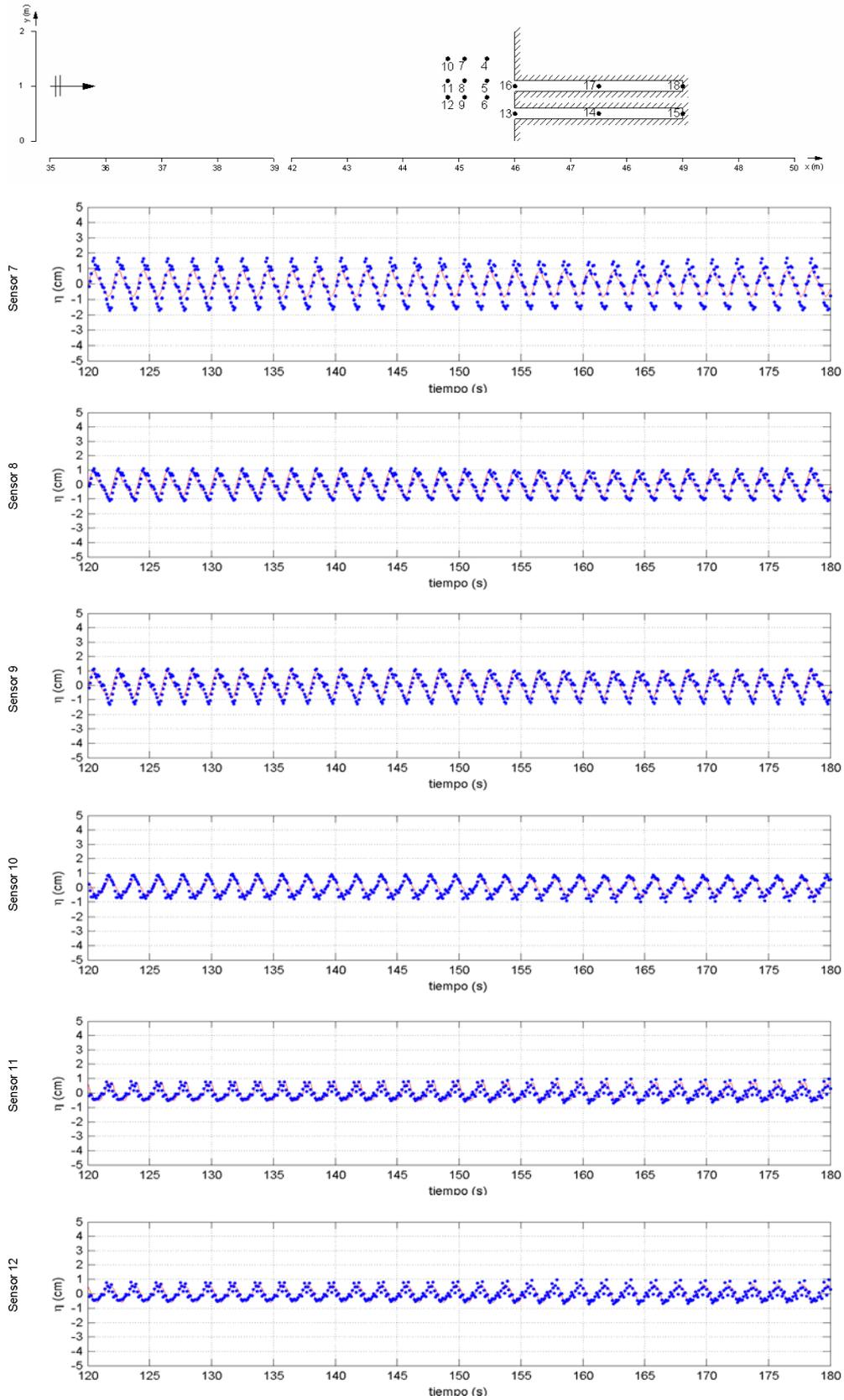


Figura 7.50 Comparación de los datos numéricos para el caso con paredes (puntos azules) vs. datos numéricos para el caso sin paredes (línea continua roja), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$.

$$\mu = 0.123 ; \varepsilon = 0.00615 ; \delta = 0.05 . \text{ Sensores 7 a 13.}$$

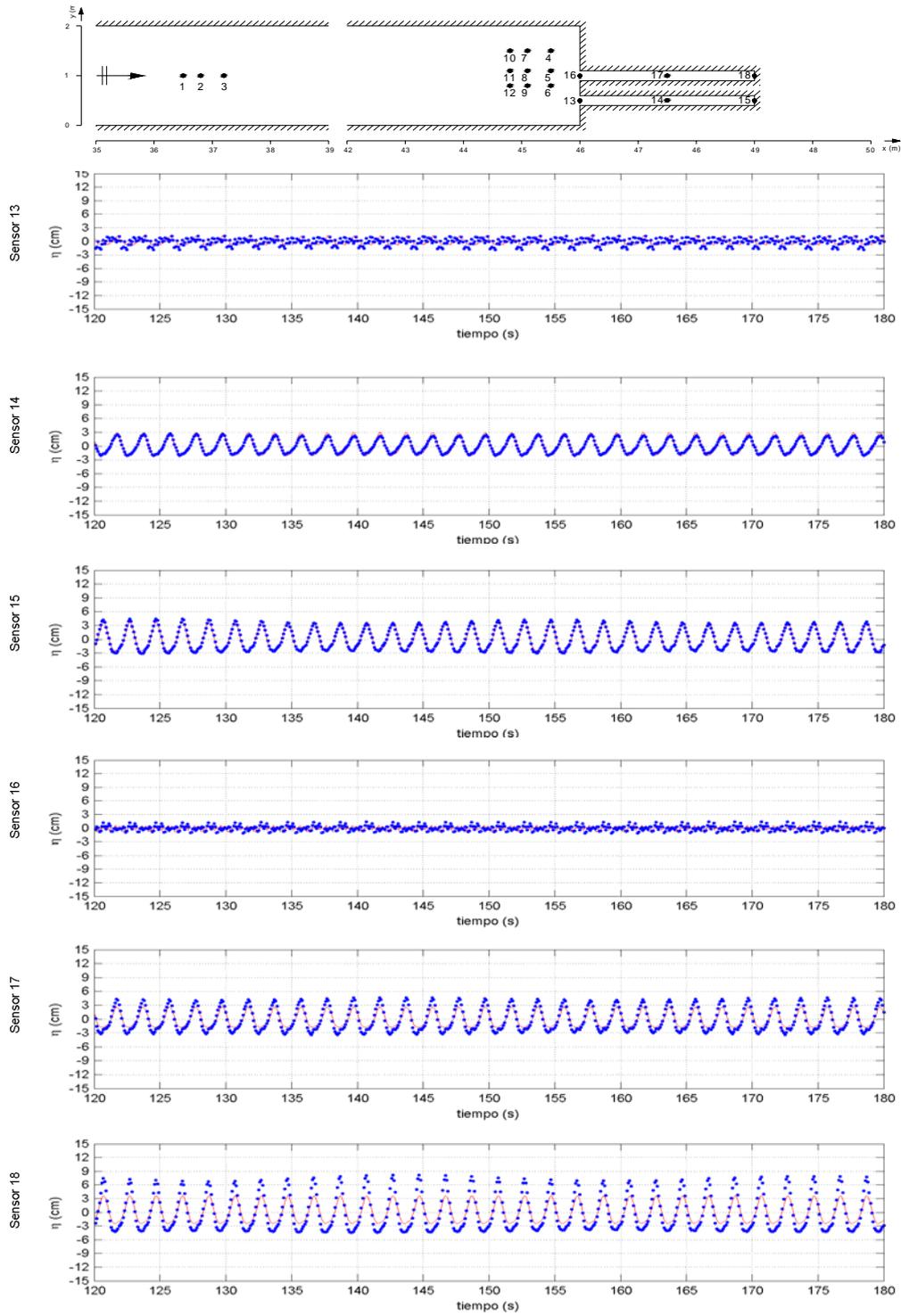


Figura 7.51 Comparación de los datos numéricos para el caso con paredes (puntos azules) vs. datos numéricos para el caso sin paredes (línea continua roja), del caso 1702, $H=0.025\text{m}$, $T=2\text{s}$, $h=0.5\text{m}$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 13 a 18.

Los registros temporales de superficie libre mostrados en las figuras 7.49 a 7.51, demuestran las diferencias de agitación portuaria resonante que se presentan al contar con una zona de radiación abierta (registros en rojo), y una zona de radiación condicionada por una pared reflejante (registros en puntos azules).

El caso 1702 sin paredes muestra un patrón de oscilaciones simétrico con respecto al eje longitudinal de propagación de la onda incidente, a diferencia del caso 1702 con paredes que muestra una fuerte oscilación transversal que condiciona la presencia de valores superiores de superficie libre en la línea de sensores 4, y 7 principalmente.

La ausencia de las paredes del laboratorio y la asimetría que guardan los canales portuarios con respecto a estas paredes, hacen que los valores de oscilación registrados en la zona de radiación disminuyan aproximadamente a la mitad, comparado con el caso con paredes laterales, principalmente en la zona más cercana a las bocanas de los puertos, línea de sensores 4, 5 y 6.

Las oscilaciones asimétricas que existen para el caso con paredes exteriores, afectan de manera importante las oscilaciones resonantes medidas en el interior del canal central (primer canal), haciendo que dichas oscilaciones resonantes disminuyan aproximadamente dos terceras partes cuando no existen las paredes del canal del laboratorio, llegando a ser equivalentes a las registradas en el segundo canal, que no parece sufrir cambio alguno entre ambas simulaciones numéricas.

En resumen, se demuestra que el sistema acoplado de dos puertos bajo efectos resonantes, puede llegar a presentar una mayor respuesta oscilatoria cuando son afectados por oscilaciones asimétricas en la zona de radiación, por presencia de paredes laterales que confinen la propagación de la onda irradiada hacia el exterior, y cuando se presente asimetría entre ambos puertos con respecto al eje longitudinal del sistema exterior.

En puertos reales, es muy común que las configuraciones portuarias muestren geometrías fuertemente asimétricas, tanto dentro de las dársenas como fuera del sistema portuario, y que las bocanas de los puertos se vean afectadas por contornos reflejantes exteriores como son acantilados y playas.

Por esto, se justifica la utilización de un modelo bidimensional, que obtenga los patrones de oscilación de forma adecuada para diversas configuraciones geométricas de las dársenas y de la zona exterior a éstas.

La figura 7.52, muestra las comparaciones de los espectros obtenidos para los sensores 4 a 18 para el caso 1702 con y sin paredes laterales externas.

En los espectros de energía obtenidos se observa con mayor claridad lo señalado anteriormente: las oscilaciones asimétricas de la superficie libre impuestas por las paredes del canal, hacen que las amplitudes aumenten en la zona de radiación principalmente, afectando de igual forma al puerto central que alcanza amplificaciones resonantes de tres veces el valor de la amplificación resonante obtenida para el caso sin paredes reflejantes (sin oscilaciones transversales).

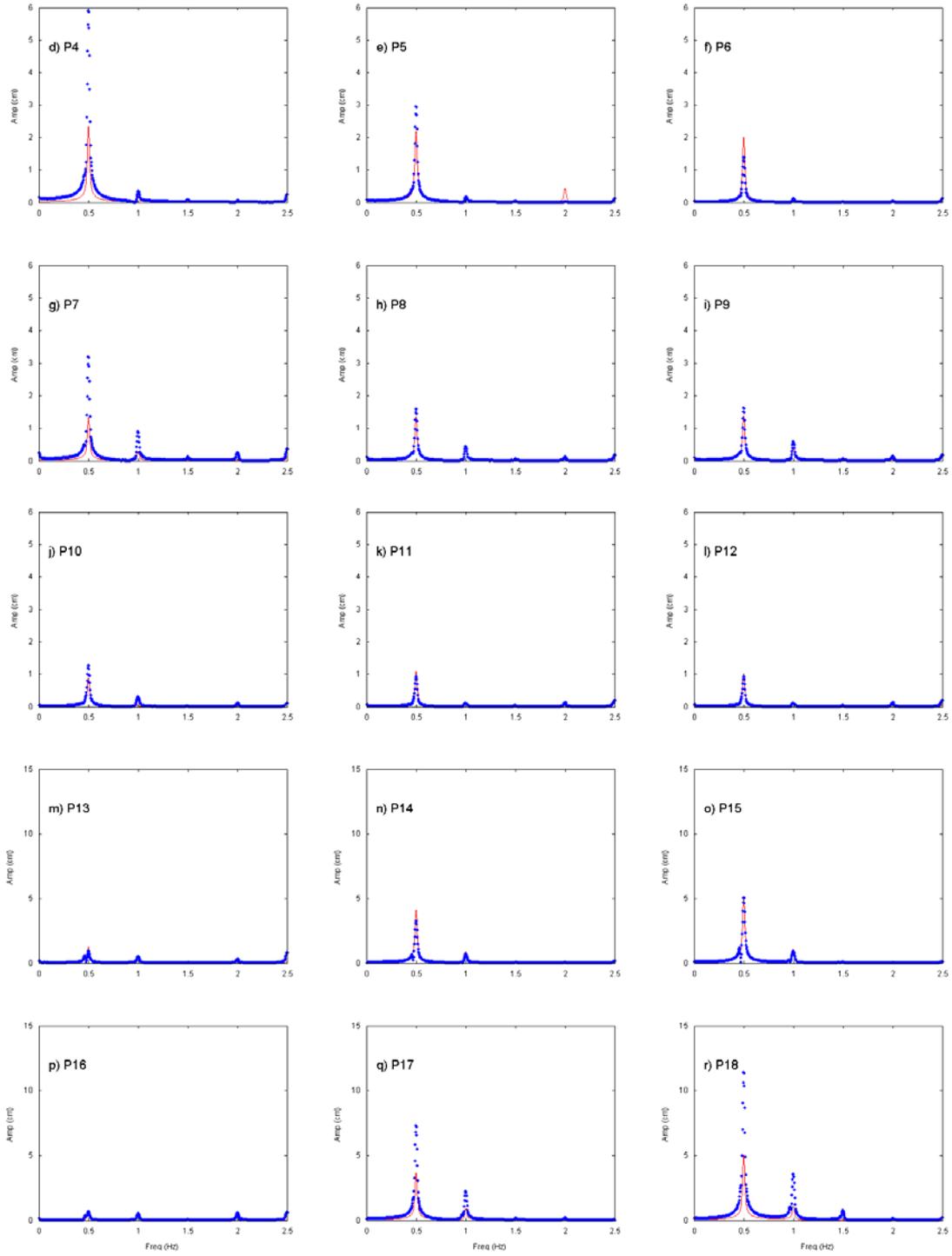


Figura 7.52 Comparación de los datos numéricos sin paredes laterales (puntos azules) vs. datos numéricos sin paredes laterales (línea continua), del caso 1702, $H=0.025m$, $T=2s$, $h=0.5m$. $\mu = 0.123$; $\varepsilon = 0.00615$; $\delta = 0.05$. Sensores 1 a 6.

b) Velocidades bidimensionales para diferentes condiciones de oscilación resonante

A continuación, se presentan los resultados de velocidades obtenidos numéricamente con el modelo MANOLO de tres casos significativos, elegidos por ser representativos de tres de los estados de oscilación observados en los ensayos de laboratorio: la situación de agitación portuaria no resonante para un solo puerto rectangular de 2m de longitud (caso 0202); resonancia en un sistema acoplado de dos puertos de 3 m cada uno (caso 1702); y, por último, el caso de un puerto resonante de 1 m, trabajando de manera conjunta con un puerto no resonante de 4 m.

Para los tres casos que se presentan en este apartado, se obtuvo información temporal de velocidades en las direcciones x - y definidas como velocidad U y velocidad V respectivamente, para los 18 puntos de control determinados en los experimentos realizados en laboratorio (capítulo 5).

Cada registro temporal de velocidad obtenido numéricamente permite visualizar el valor de velocidad en tres diferentes puntos en el perfil vertical o dimensión z : en la superficie libre $z = h + \eta$, en la profundidad $h = z_\alpha = \alpha \cdot h$, y en el fondo $z=h$, que en este caso, por tratarse de simulaciones de ondas cercanas a las profundidades reducidas, el perfil de velocidades es prácticamente vertical, y los tres valores de velocidad son similares.

Las figuras que se muestran a continuación son el resultado de la aplicación de una técnica de promediado en el dominio de tiempo, de los valores de velocidad de series de 30 ondas individuales y consecutivas (de 60s a 120s de simulación), obtenidas numéricamente en cada uno de los 18 puntos de control seleccionados.

Los pares de figuras 7.53a,b, 7.54a,b y 7.55a,b muestran los valores de velocidad promediada en la fase para las simulaciones correspondientes a los casos de laboratorio 0202, 1702 y 1002 respectivamente, para los valores de velocidad en las direcciones U (dirección principal de propagación) y V y para las tres profundidades de medición numérica, superficie η , posición Z_α , y fondo.

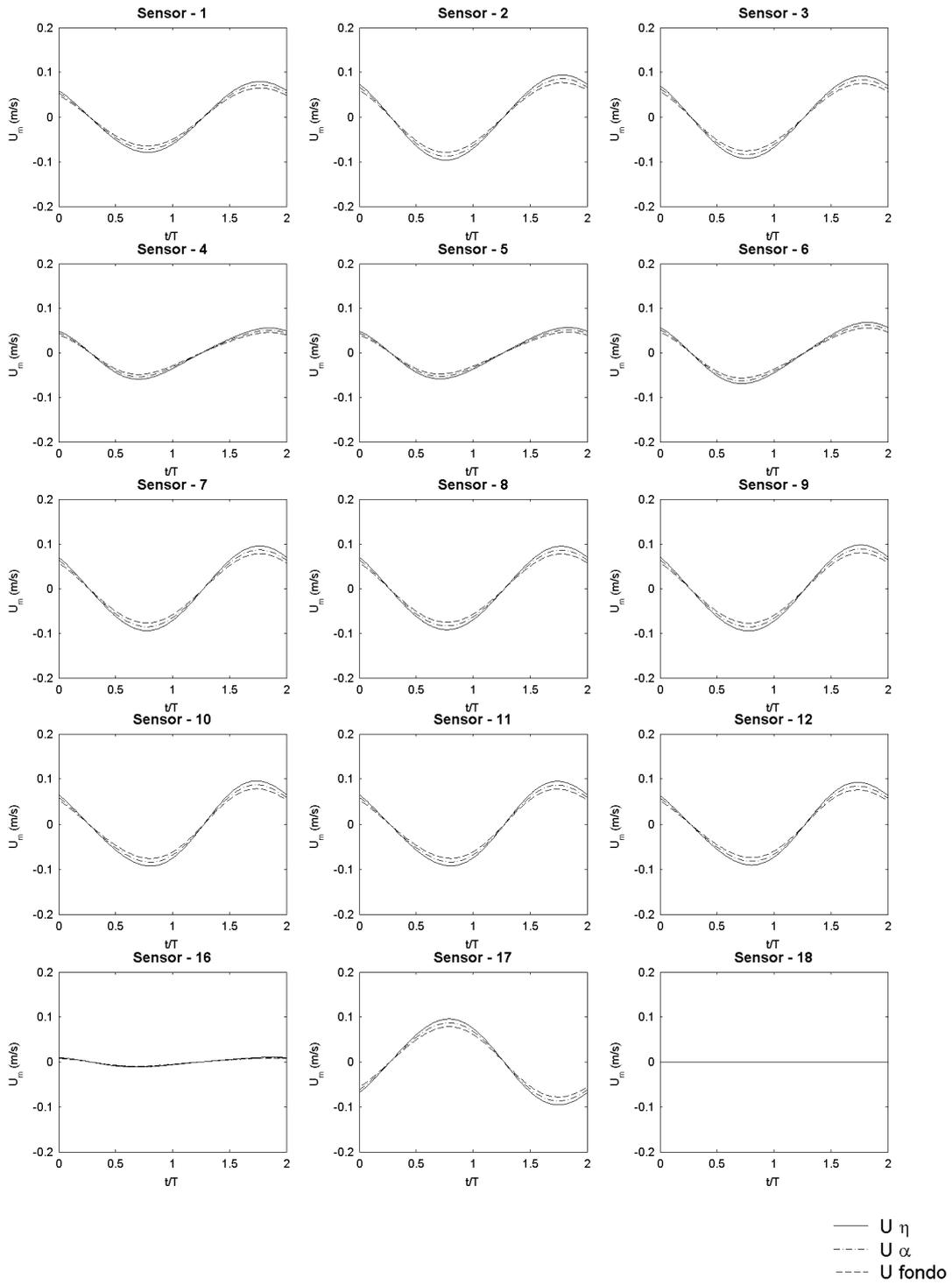


Figura 7.53a Velocidad U promediada en fase, caso 0202

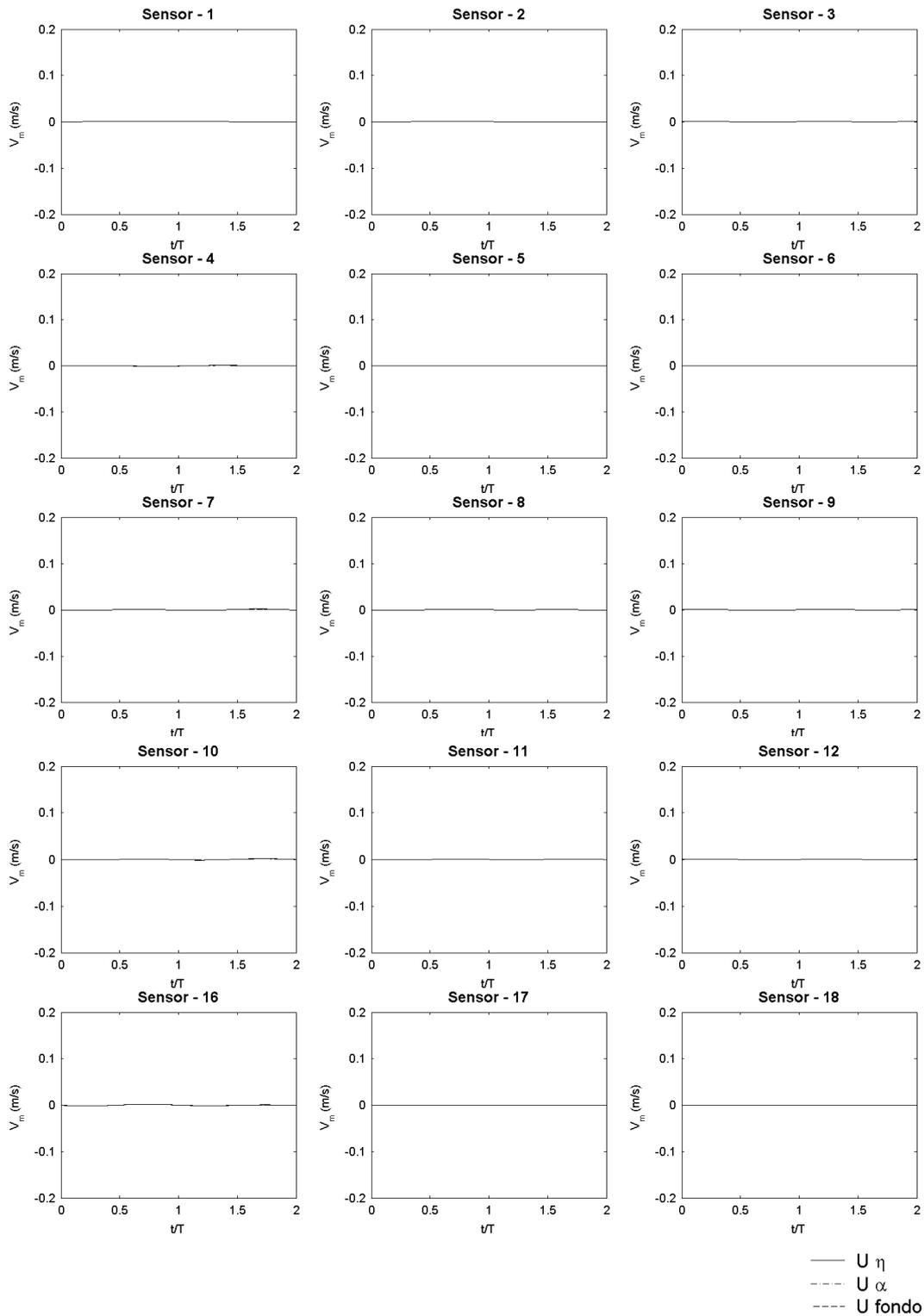


Figura 7.53b Velocidad V promediada en fase, caso 0202

En las figuras 7.53a y 7.53b, se puede observar que todos los sensores situados en la zona exterior al puerto (1 a 12), presentan valores medios de velocidad en la dirección U muy similares entre si, alcanzando valores simétricos en las crestas y en los senos de aproximadamente 0.1 m/s.

El caso 0202 mostrado en las dos figuras anteriores, presenta oscilaciones portuarias no resonantes con patrones de agitación ordenados y unidimensionales en la dirección U , típicos de sistemas estacionario (interacción de onda incidente + onda reflejada). Los valores de velocidad media en la dirección V son nulos, lo que significa que el flujo se mueve cuasi-unidimensionalmente en la dirección de propagación principal U , sin la existencia de ondas transversales en el dominio numérico.

Se observa también que los valores medios de velocidad obtenidos en las tres profundidades, son prácticamente iguales.

Para el caso resonante 1702, figuras 7.54a y 7.54b, que consiste en un sistema acoplado de dos puertos rectangulares con 3m de longitud cada uno, se obtienen valores medios de la componente U de la velocidad cercanos a 0.1 m/s, tanto en la zona de radiación (sensores 4 a 12) como en la zona de incidencia (sensores 1 a 3).

Los sensores 3, 4, y 5, muestran pequeñas variaciones asimétricas en los valores medios de velocidad con respecto al eje medio, con crestas más planas que los senos, lo que significa que los patrones de oscilación dejan de ser cuasi-unidimensionales y adoptan movimientos transversales en la dirección de la componente de la velocidad V , debido a los efectos de las oscilaciones resonantes y la influencia del flujo que se irradia desde las dos bocanas.

Dentro de los canales rectangulares, se observan mayores valores medios de velocidad U en la bocana (sensores 13 y 16) y en los puntos localizados a la mitad de los canales (sensores 14 y 17), alcanzando valores medios de $U=0.2$ m/s en el primer canal.

Al igual que en el caso 0202, los valores de velocidad en la dirección U son nulos al final de ambos canales (sensores 15 y 18), demostrando que las velocidades normales a los contornos son iguales a cero, cumpliendo con la condición de contorno de pared reflejante (condición de no flujo).

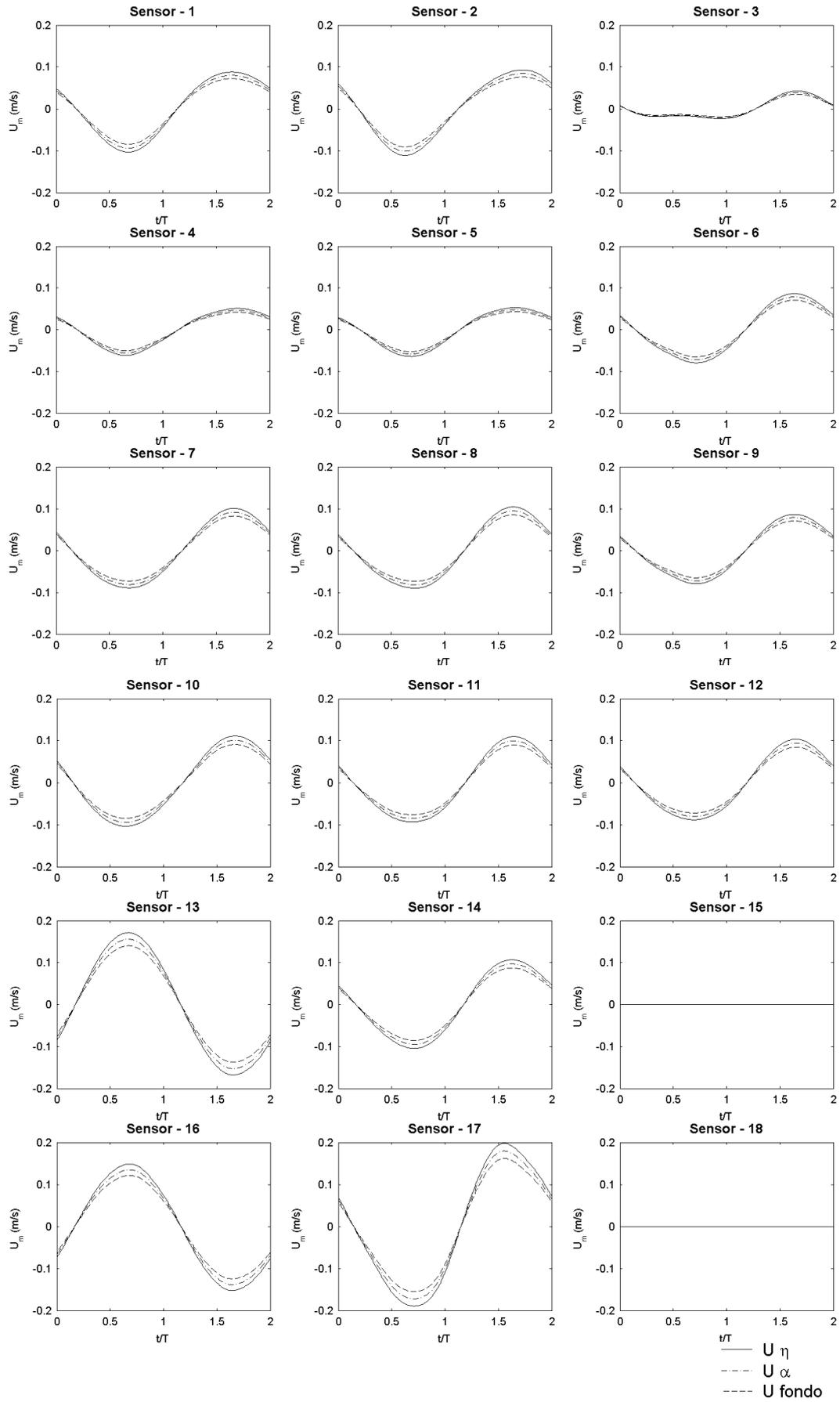


Figura 7.54a Velocidad U promediada en fase, caso 1702

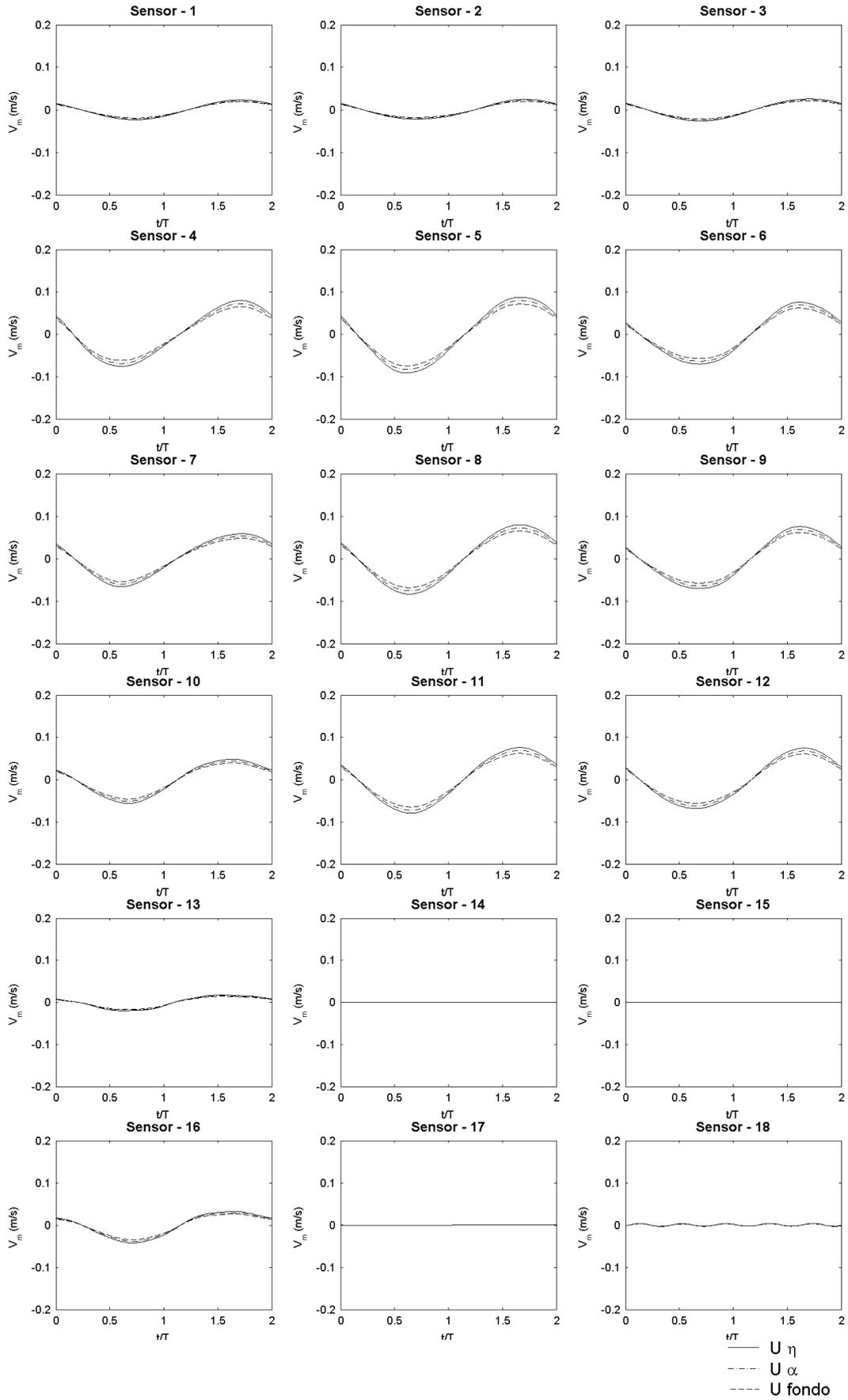


Figura 7.54b Velocidad V promediada en fase, caso 1702

La figura 7.54b, muestra la componente transversal de la velocidad V , que presenta magnitudes de velocidad media similares a los registrados en la dirección de la componente U , principalmente en la zona de radiación (sensores 4 a 12) de 0.1m/s.

La acción de la onda transversal dentro del dominio parece perder protagonismo conforme se aleja de la zona portuaria, situación que se observa en los sensores de la zona de incidencia (1 a 3) que debido a su lejanía con la zona portuaria, presentan valores de velocidad media de aproximadamente $V=0.01$ m/s.

En la zona portuaria, la influencia de la onda transversal alcanza a las bocanas (sensores 13 y 16) pero no llega a penetrar hacia en puertos rectangulares, que registran valores nulos de la velocidad media transversal, V .

Finalmente, se completa este apartado con los resultados medios de velocidad obtenidos numéricamente para el caso 1002 que consiste en un sistema de dos puertos rectangulares paralelos, de 4m (no resonante) y de 1m (resonante) de longitud, respectivamente.

Se eligió este caso para como ejemplo de aquellos simulados en laboratorio que presentaron una fuerte interacción entre bocanas durante las oscilaciones resonantes. La figura 7.55a muestra las velocidades medias promediadas en la fase de la onda incidente para la dirección principal correspondiente a la componente U .

Para todos los puntos exteriores a la zona portuaria, se tiene que las velocidades medias en U presentan patrones simétricos similares a los observados en el caso 1702.

Para los sensores situados en el interior de los puertos rectangulares, se tienen dos comportamientos bien definidos. Para el puerto no resonante (sensores 16 a 18), las velocidades medias no superan el valor de $U=0.05$ m/s, debido a las oscilaciones no resonantes registradas en dicho canal, mientras que para el puerto resonante (sensores 13 a 15), se observa un importante aumento en los valores de la velocidad media en la bocana (sensor 13), superando las velocidades en los senos (descarga del flujo) a las velocidades en las crestas (entrada del flujo), y mostrando una fuerte asimetría en los valores positivos de velocidad (mayor tiempo de carga que de descarga).

Estas fuertes descargas de flujo que se transmiten desde el canal resonante, hacia la zona de radiación a través de la bocana, forman parte del mecanismo de formación de un sistema de ondas transversales que se mueve desde la zona portuaria hacia la zona de incidencia, generando a su vez un sistema de velocidades transversales en la dirección V , mostrado en cada punto dentro del dominio en las figura 7.55b.

Las velocidades medias transversales V del caso 1002, muestran valores simétricos con respecto al eje medio, y conservan el valor de 0.05 m/s en cresta y seno, constante en los nueve puntos de la zona de radiación, mientras que en la zona de incidencia se verifica que la acción de la onda transversal tiene una menor influencia, con valores aproximados de 0.02 m/s.

Dentro de las bocanas la acción de la onda transversal es nula, tal y como se observó en los dos casos anteriores 0202 y 1702.

Los valores de velocidad hasta ahora mostrados, únicamente nos arrojan información numérica que no se puede contrastar con registros físicos, debido a que no se realizaron mediciones temporales de velocidad de las simulaciones realizadas en laboratorio.

Sin embargo, los valores medios de velocidad observados nos permiten verificar el buen comportamiento del modelo numérico, la generación de corrientes transversales, efectos de chorro en las bocanas, y las condiciones de velocidad en los contornos verticales.

Por otra parte, la ecuación lineal de velocidad horizontal para las ondas largas que se muestra a continuación, indica que para el rango de alturas de onda que fue registrada durante la fase experimental en laboratorio (de 0.025 a 0.05 m), se obtienen velocidades horizontales con valores mínimos de 0.115 m/s y máximos de 0.221 m/s, valores que coinciden con los observados en las gráficas anteriores.

$$U = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \cos(kx - \omega t) = \eta \frac{gk}{\omega} = 4.42\eta$$

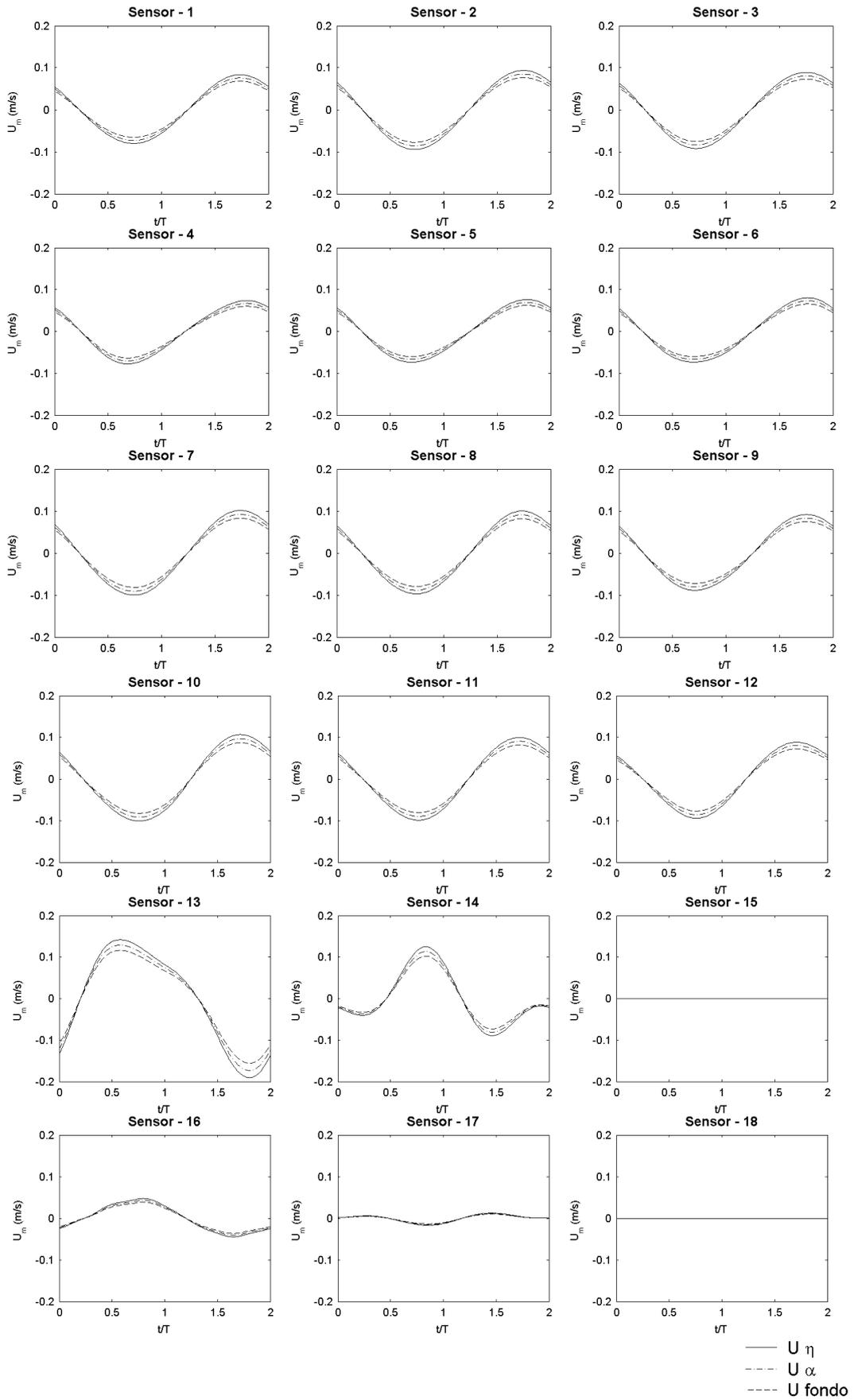


Figura 7.55a Velocidad U promediada en fase, caso 1002

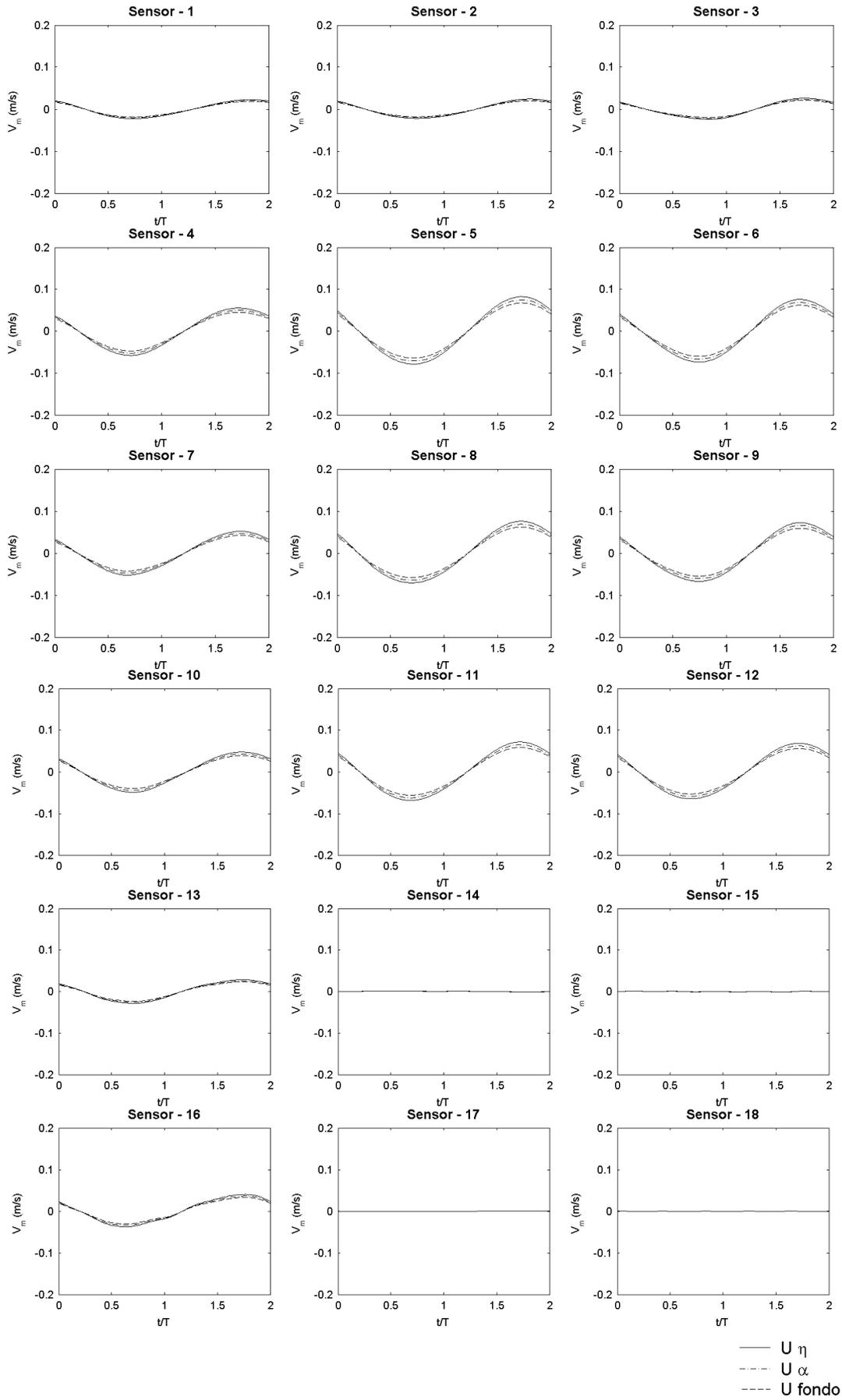


Figura 7.55b Velocidad V promediada en fase, caso 1002

Finalmente, las figuras 7.56 a 7.58 muestran la representación vectorial de la velocidad en la superficie libre obtenida numéricamente, en el plano bidimensional x-y, para los casos 0202, 1702 y 1002 respectivamente, y para diferentes instantes de tiempo.

Los vectores de velocidad correspondientes al caso 0202 (figura 7.56, caso no resonante), muestran un comportamiento cuasi unidimensional con valores de velocidad similares en todo el dominio numérico, con patrones ordenados de nodos y antinodos.

En general las velocidades obtenidas numéricamente para los casos no resonantes en presencia de un solo puerto abierto, presentaron condiciones cuasi-unidimensionales en la dirección U , con velocidades nulas en las bocanas y al fondo del canal y con valores de velocidad iguales tanto dentro como fuera del canal portuario.

La figura 7.57 que corresponde al caso resonante 1702, muestra que los vectores de velocidad presentan direcciones compuestas por las componentes $U-V$, indicando la formación de una onda transversal que se forma fuera de los canales portuarios, por efecto de chorro en las bocanas y reflexión de las paredes verticales en el exterior del canal portuario por la asimetría del sistema portuario, resultando en patrones de oscilación transversales.

Las velocidades obtenidas para el caso 1702, son un claro ejemplo de la interacción que existe entre dos dársenas que oscilan conjuntamente con importantes efectos resonantes, presentando fuertes transferencias de energía entre bocanas, e inclusive llegando a compartir las velocidades del flujo en la zona de radiación por efecto de las descargas desde las bocanas.

El caso de oscilación mixta (no resonante y resonante) para el caso 1002 y mostrado en la figura 7.58, presenta vectores de velocidad que alcanzan los máximos valores en la zona de radiación próxima al puerto resonante de 1m de longitud. Las direcciones de la velocidad oscilan cíclicamente entre las dos bocanas, generando un sistema trasversal de velocidades en toda la zona de radiación, que penetran de una bocana hacia la otra en cada ciclo de oscilación.

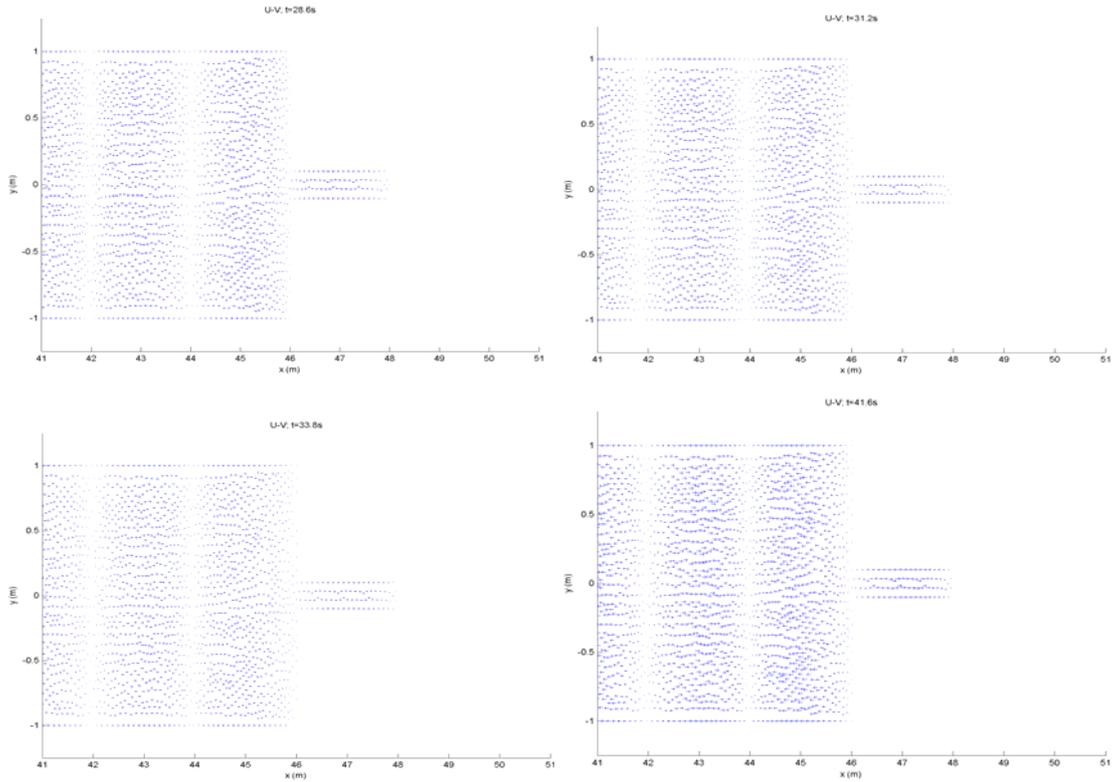


Figura 7.56 Vectores de velocidad en la superficie libre para el caso 0202 en diferentes instantes de tiempo en el plano x-y.

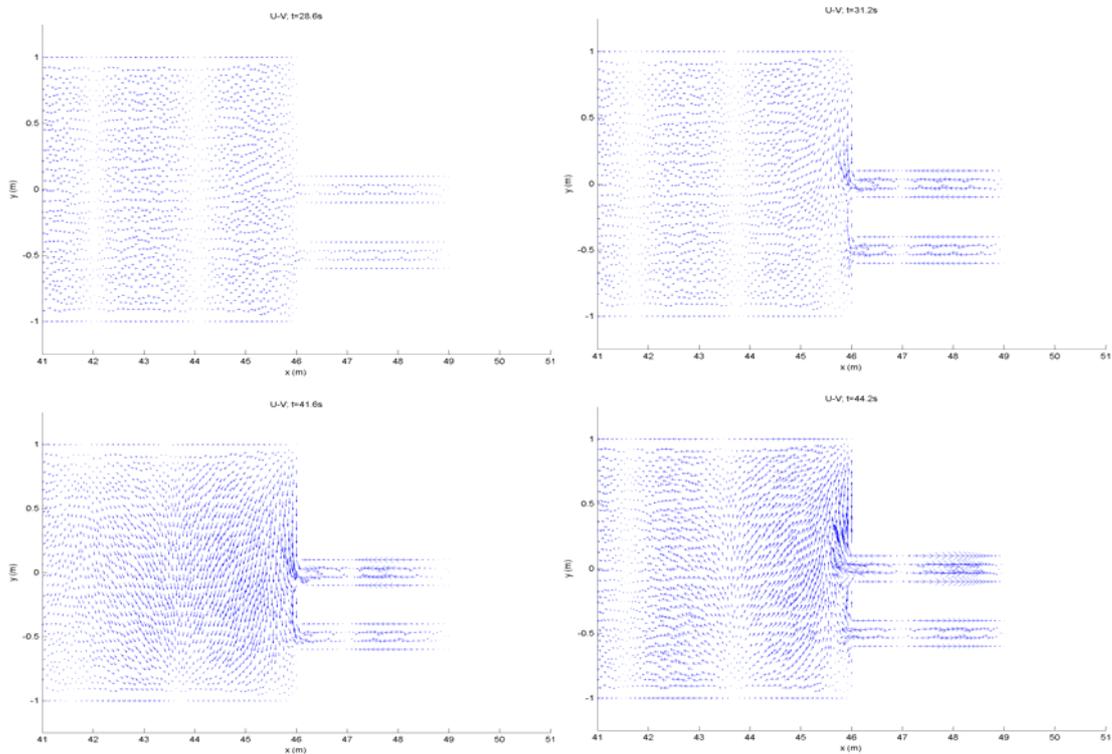


Figura 7.57 Vectores de velocidad en la superficie libre para el caso 1702 en diferentes instantes de tiempo en el plano x-y.

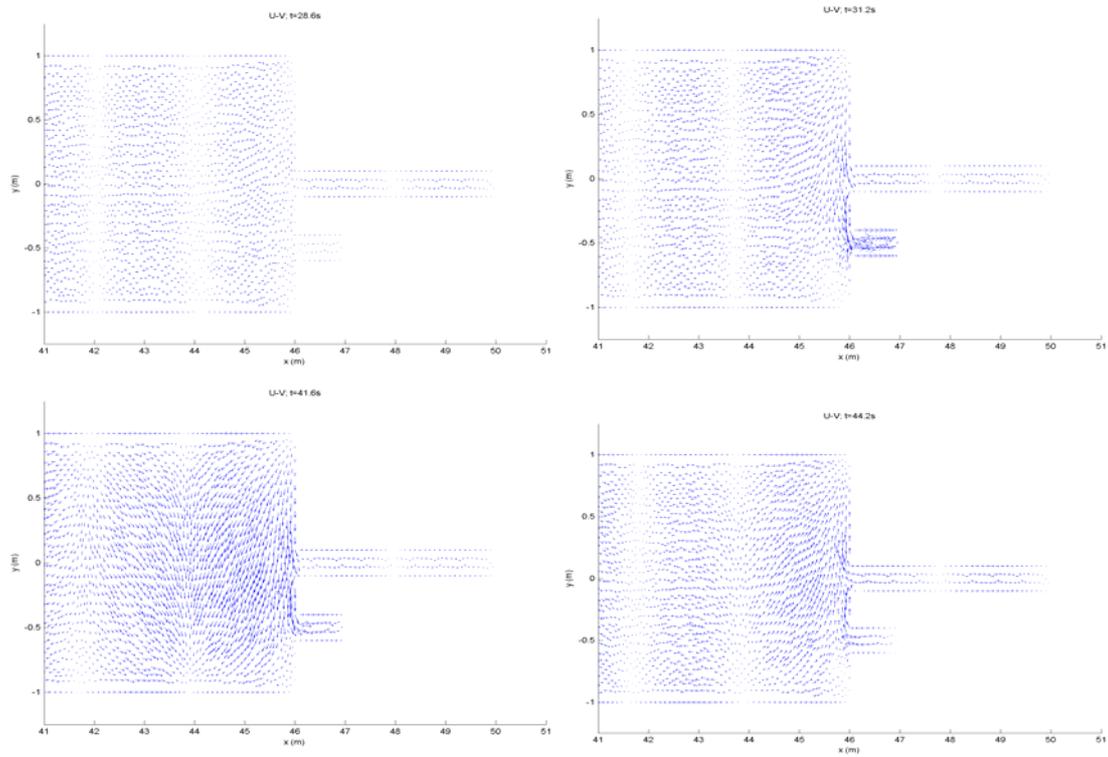


Figura 7.58 Vectores de velocidad en la superficie libre para el caso 1002 en diferentes instantes de tiempo en el plano x-y.

Este tipo de análisis puede ser importante para el análisis de la renovación y calidad de agua en dársenas portuarias así como para el estudio de posibles aterramientos.

7.4 CONCLUSIONES Y MEJORAS

7.4.1 Conclusiones

Tras el análisis, mejora y validación del modelo numérico avanzado de propagación de oleaje MANOLO, basado en las ecuaciones modificadas de Boussinesq, se ha llegado a la conclusión de que el modelo constituye una herramienta con un gran potencial para el estudio de problemas asociados a la agitación y resonancia portuaria.

En el capítulo 6, y con base en diversos casos de validación que ofrece la literatura y el trabajo experimental propio, se ha demostrado que el modelo simula adecuadamente procesos de dispersividad, asomeramiento, reflexión, refracción, difracción, y radiación del oleaje hacia el exterior de los puertos, así como los procesos no lineales y de transferencia energética entre frecuencias involucradas en casos de resonancia portuaria.

Más aún, la validación realizada con diversos casos de laboratorio ha puesto de manifiesto las capacidades y ventajas que el modelo numérico presenta para la realización de estudios de resonancia portuaria. Especialmente, a la hora de complementar el trabajo en el laboratorio, considerando geometrías que se ven limitadas por las instalaciones o por los recursos existentes.

Se ha presentado una metodología para el diseño de las simulaciones numéricas, que aunque se ha fundamentado en los experimentos en laboratorio mostrados en el capítulo 5, puede ser extrapolada a cualquier caso de simulación que se requiera, ya sea para la reproducción de posibles trabajos experimentales, como para el estudio de propagaciones de oleaje sobre lechos y contornos reales, como se mostrará en el capítulo siguiente.

Se ha demostrado que la utilización de una malla en elementos finitos triangulares, con características adaptativas, es muy adecuada para llevar a cabo simulaciones numéricas de agitación portuaria, especialmente para aquellas zonas en donde el oleaje sufre transformaciones complejas como en bocana de entrada de los canales portuarios mostrados.

Tras la simulación de los ensayos de laboratorio para los casos resonantes y no resonantes, y para las combinaciones entre longitudes de ambos canales portuarios, se ha observado que el modelo es capaz de reproducir muy bien las series temporales en prácticamente todos los puntos considerados en el interior del dominio computacional. Es necesarios hacer constar que todas las simulaciones se han realizado sin hipótesis simplificativa alguno de los casos de laboratorio, ya que el modelo no se ha realizado ningún escalado del modelo numérico con respecto al prototipo.

Se ha introducido la técnica espectral wavelet como herramienta de apoyo para el análisis de los datos de superficie libre obtenidos de las simulaciones, para los casos resonantes y no resonantes. Esto permite la observación de la transitoriedad del problema durante los procesos de transferencia no lineal y acoplamiento que experimentan las dársenas portuarias bajo los efectos de resonancia.

Los casos no resonantes simulados numéricamente mostraron un ajuste muy bueno, tanto para un puerto trabajando en solitario como para la interacción de dos puertos no resonantes trabajando de forma acoplada, encontrándose que la energía modelada para el primer y segundo armónico principales alcanza valores con una alta correlación con las series experimentales. Solo para algunos casos, el tercer armónico muestra discrepancias con un error medio del 9.5% debido a que el rango de aplicación del modelo queda por fuera del rango de validez de las ecuaciones para dicho dicho armónico.

Todos los casos resonantes mostraron una buena correlación para la energía del primer armónico, con errores medios por debajo del 5%, un adecuado comportamiento para los valores obtenidos para el segundo armónico en ocasiones con un error medio del 10% y en ocasiones con errores menores al 4%, situación que se repite para el tercer armónico. Los errores señalados no guardan relación aparente con el comportamiento particular de los casos resonantes, es decir, no muestran tendencia alguna si los intentamos relacionar con la magnitud de las amplificaciones resonantes, con las longitudes portuarias, o con las diferentes alturas de onda incidente.

Una posible causa de la presencia de errores obtenidos particularmente para el segundo armónico, se atribuye a que la bocana portuaria induce fuertes pérdidas de energía en las

series medidas experimentalmente tal como señaló Lepelletier (1980), debido al cambio abrupto en este estrechamiento geométrico, que induce a una separación importante del flujo y generación de vórtices en la entrada, una formación de un chorro de entrada/salida, y una disipación por turbulencia que el modelo numérico no es capaz de simular.

Sin embargo, los errores que se observan en los armónicos segundo y tercero, no modifican de manera significativa las series temporales de superficie libre obtenidas numéricamente y sus amplitudes en la propagación hacia el interior del puerto, así como las sobre-amplificaciones alcanzadas por los efectos resonantes son bien representadas por el modelo a lo largo del tiempo de simulación considerado.

Finalmente, la observación de los valores bidimensionales (plano x - y) de superficie libre y velocidad obtenidos para los casos simulados numéricamente, ha mostrado la importancia de contar con un modelo bidimensional de estas características para poder entender detalladamente los procesos de transferencia energética que tienen lugar entre las diferentes bocanas, los posibles efectos de acoplamiento bajo efectos resonantes y la generación de onda transversal por efectos asimétricos en los contornos, dentro y fuera de los puertos. Esto solo es posible con un modelo de estas características.

7.4.2 Aspectos a mejorar del modelo

Al trabajar con el modelo numérico MANOLO, analizar sus ecuaciones, esquema de resolución y los mecanismos de generación y disipación del oleaje, se han observado diversas limitaciones y aspectos que deben ser optimizados de cara a la mejora en su utilización e implementación como parte de las metodologías o herramientas del técnico:

- a) A pesar de haber conseguido un aumento sustancial de la velocidad y una disminución en el uso de memoria, es necesario optimizar aún más los tiempos de simulación (CPU), buscando obtener resultados en periodos de tiempo menores para que el modelo pueda ser utilizado de manera rutinaria dentro de los estudios de agitación portuaria.

- b) Es necesario trabajar en la implementación de condiciones de contorno alternativas a la esponja para simular la absorción parcial. Esto es especialmente importante para el modelado de diques permeables en estudios de agitación producida por onda corta.
- c) Es necesario realizar una validación detallada de los valores numéricos de las velocidades bidimensionales en el fondo, en la superficie y en la profundidad definida por Nwogu (1993). Para ello, sería necesario contar con datos experimentales y datos medidos en campo, tanto considerando condiciones de agitación portuaria como para el estudio de la transformación del oleaje en zona de rompientes. Este factor es importante antes de emprender cualquier iniciativa destinada a la aplicación del modelo para el estudio de renovación de agua, aterramientos o sistemas circulatorios en playas.
- d) Se requiere ahondar en el estudio de las características de rotura que el modelo ofrece, y al igual que en el caso de la validación de las velocidades, el modelo requiere ser validado con mediciones de campo y experimentales para playas con diferentes configuraciones y granulometrías.

Algunos de estos aspectos serán considerados con mayor concreción en el apartado relativo a futuras líneas de trabajo.