

Caracterización de posibles fenómenos de resonancia en la futura dársena exterior de Levante del puerto de Málaga mediante modelación numérica

M. GARCÍA MAÑES (*) y M^a. J. MARTÍN SOLDEVILLA (*)

RESUMEN Este estudio de onda larga, enfocado a la caracterización de posibles frecuencias, o periodos, de resonancia, está basado en una modelación numérica, de tipo 2D, de la nueva dársena deportiva, o de Levante, que se prevé en el exterior del puerto de Málaga, y en la aplicación de las ecuaciones de Boussinesq, integradas en profundidad, con el establecimiento del problema de evolución y de contorno correspondiente. La zona modelada abarca desde la futura dársena hasta la playa de la Malagueta hacia la que está orientada la bocana y con la que pueden establecerse fenómenos resonantes por la presencia de periodos, asociados al oleaje de la zona, próximos a algunos de los periodos propios tanto transversales, o entre paredes, como longitudinales de la dársena y de ésta con el contorno de la playa. La caracterización de tales periodos se ha llevado a cabo mediante el análisis del espectro de respuesta a una señal de entrada, o serie temporal de flujo de agua, extraída de un espectro plano o de ruido blanco, de densidad espectral constante en un rango de frecuencias que abarca periodos entre 25 y 350 segundos. Se ha detectado un periodo en torno de 70 s que pudiera corresponder a un segundo modo de oscilación transversal entre la dársena y la playa. Para su verificación se han realizado ensayos numéricos con un oleaje de entrada monocromático de periodo 70 s y se ha observado a lo largo de diferentes secciones de control establecidas, que la oscilación de la lámina de agua responde, precisamente, a un segundo modo de oscilación transversal con dos nodos interiores (elevación nula y máxima velocidad horizontal) y tres antinodos (máxima elevación y velocidad horizontal nula), situados en los extremos de una de las secciones (playa y fondo de la dársena) y otro hacia el centro de dicha sección. Dado que el estudio no ha podido contrastarse con datos reales, al no disponer de medidas a través de sensores de presión instalados en las paredes de la futura dársena, se han realizado, así mismo, dos simulaciones con oleaje real correspondiente a dos temporales de la zona con registros medidos por la boya de Málaga de la red costera española. Del análisis espectral de las series temporales de elevaciones, calculadas en diversos puntos, a lo largo de la simulación numérica, se ha obtenido un periodo entre 70 y 80 s que vendría a confirmar al estudio teórico realizado al constatar la presencia de un periodo, próximo al segundo modo propio de oscilación transversal detectado, y posiblemente asociado a las ondas de grupo que acompañan a los oleajes ensayados.

NUMERICAL SIMULATION OF POSSIBLE RESONANCE PHENOMENA IN THE FUTURE EASTERN EXTERNAL DOCK OF THE HARBOUR OF MALAGA

ABSTRACT Resonant frequencies of the new recreational external eastern dock of the harbour of Malaga (Spain), have been analyzed with a Boussinesq numerical model. The computational area includes an important part of the Malagueta beach, placed in front of the mouth of the future dock, and considered as a possible generation source of infragravity energy. In order to determined all possible oscillations modes of the sheltered area, a previous simulation with a colour spectrum with equal energy into $25s^{-1}$ to $350s^{-1}$ frequency range, was carried out. The analysis of the response spectra gotten in the control points showed an important amplification at $70s^{-1}$. The simulation with monochromatic wave of 70s period pointed out a second transversal oscillation mode among the Malagueta beach and the inner quay of the new dock. Additional numerical running using measured data coming from Malaga Spanish buoy network, placed near of the harbour, leads similar amplifications in the range of $70s^{-1}$ - $80s^{-1}$ close to that obtained theoretically.

Palabras clave: Resonancia, Dársena, Levante, Málaga.

Keywords: Resonance, Dock, The Levant, Malaga.

(*) Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid.



FIGURA 1.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la orientación de la dársena exterior de Levante con el cierre previsto, que la convierte en dársena deportiva con la bocana enfrentada hacia la playa de La Malagueta, es de prever algún fenómeno de resonancia, por la presencia, entre otras posibles causas, de ondas largas asociadas a los grupos de olas, Bowlers (1980), característicos de esta zona marítima y habida cuenta del carácter reflejante de la playa sobretodo en su perfil de invierno, Watson, Barnes y Peregrine (1994).

En este artículo se analizan mediante la modelación numérica del entorno de la nueva dársena, con un modelo 2D basado en la aproximación de Boussinesq a las ecuaciones de la hidrodinámica de Navier-Stokes, los posibles periodos de onda larga que pudieran presentar, dada la geometría de la zona de estudio, un carácter resonante, de acuerdo a las aproximaciones teóricas.

Se han realizado, así mismo, ensayos numéricos considerando, como entrada al modelo, oleaje real medido por la boya de la red costera (REMRO) de Málaga y se han analizado a continuación, las series temporales de altura de ola (elevación de la superficie), obtenidas en varios puntos de control situados junto a las paredes de la nueva dársena. Se han calculado, posteriormente, los espectros asociados a dichas series a fin de corroborar, en su caso, la presencia de los periodos de onda larga detectados teóricamente.

2. DESCRIPCIÓN

En la figura 1 puede observarse la situación actual de la futura dársena exterior o de Levante del puerto de Málaga y en las figuras 2 y 3 se aprecian detalles con la configuración futura y un esquema con todo el puerto y con la batimetría de la zona.

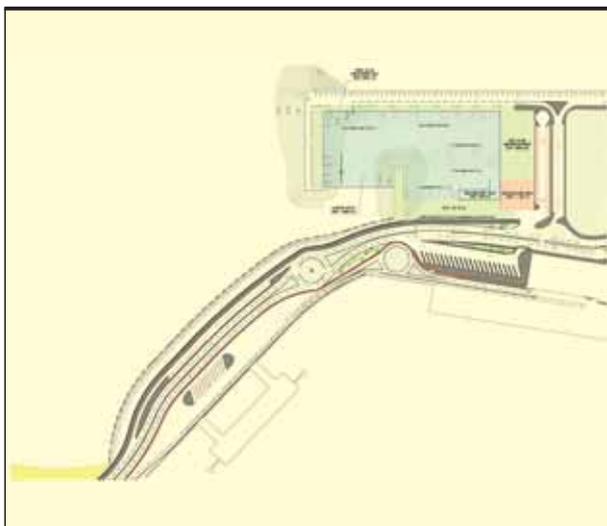


FIGURA 2. Planta de la futura dársena de Levante.

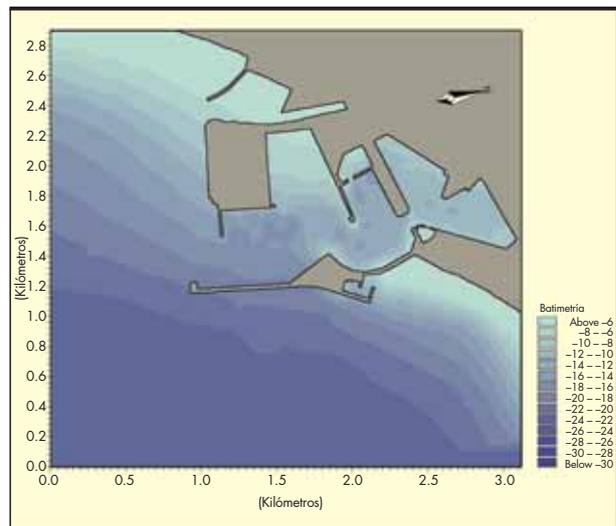


FIGURA 3. Batimetría del puerto y entorno.

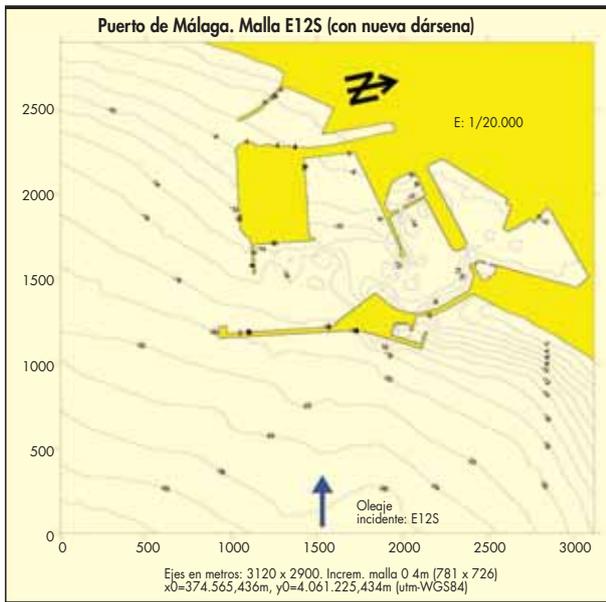


FIGURA 4. Malla de cálculo.

La presencia de ondas de grupo asociadas al oleaje que más afecta a la zona marítima de Málaga y en particular a la nueva dársena exterior, procedente en aguas profundas de los sectores de 22.5°: E, ESE y SE, y una dirección de incidencia en sus proximidades E12°S, ha motivado la realización del estudio de ondas largas que se presenta. Por esta razón la malla de cálculo se ha orientado según la dirección del oleaje incidente como puede apreciarse en la figura 4.

La metodología seguida, en el estudio teórico, ha consistido en realizar ensayos en modelo numérico considerando como oleaje de entrada una serie temporal de altura de ola (en realidad se ha utilizado una serie temporal de flujo de agua, al utilizar la llamada generación interna del oleaje en una línea paralela al borde inferior, o de entrada, y próxima al mismo), extraída a partir de un espectro de ruido blanco (erb) o de densidad espectral constante ($S_0 = 0.02651515 \text{ m}^2\text{s}$, con una amplitud de onda significativa $A_0 = 0.05 \text{ m}$), en un amplio rango de frecuencias: $f_m = 0.002857 \text{ s}^{-1}$ ($T_M = 350 \text{ s}$), $f_M = 0.05 \text{ s}^{-1}$ ($T_m = 20 \text{ s}$).

Dadas las reducidas dimensiones y la profundidad en la zona de interés de este estudio que abarca desde la nueva dársena, a una profundidad media aproximada de 13 m, hasta la playa de la Malagueta, no pueden desarrollarse periodos de oscilación de la lámina de agua superiores a unos

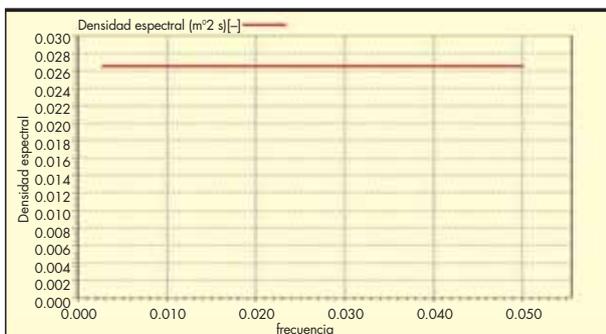


FIGURA 5. Espectro de ruido blanco (detalle).

180 s. Sin embargo dado que en la modelación, se ha incluido todo el puerto de Málaga, para posibles futuros estudios, el límite superior en los periodos a analizar ha sido de 350 s.

En la figura 5 aparece, en un detalle, el espectro de ruido blanco. Utilizando la transformada inversa de Fourier se ha pasado del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, representándose en las figuras 6 y 7 las serie temporales de altura de ola (m) y de flujo ($\text{m}^3/\text{s.m}$) respectivamente, de dicho espectro, con una duración \approx de 2 h 27 min.

$$\delta f = f_M - f_m, A_0 = \sqrt{2S_0\delta f} \Rightarrow S_0 = \frac{A_0^2}{2\delta f} = 0.02651515 \text{ m}^2\text{s}$$

Una vez realizada la simulación numérica con el modelo 2D de evolución, de tipo hiperbólico (módulo Boussinesq del programa Mike21 del Instituto Danés de Hidráulica, DHI), con las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento integradas en profundidad, y utilizado método de diferencias finitas en la integración de las mismas, se han obtenido las series temporales de altura de ola en diversos puntos localizados, junto a las paredes verticales de la nueva dársena y en la playa de La Malagueta (figuras 8 y 9). Mediante la técnica del algoritmo transformada rápida de Fourier (FFT) se han obtenido los espectros de respuesta en cada uno de los puntos mencionados.

Lógicamente, en dichos espectros, discretos, la energía (o la densidad espectral), ya no es constante en cada una de las bandas de frecuencias del rango considerado.

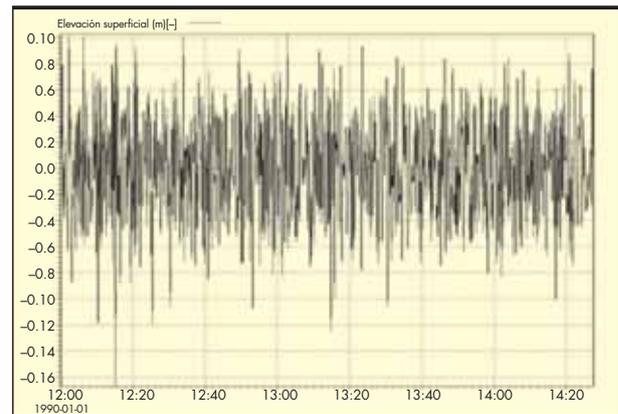


FIGURA 6. Serie temporal de alturas (erb).

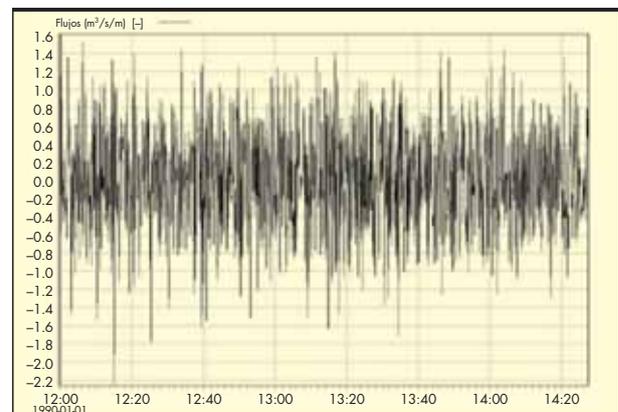


FIGURA 7. Serie temporal de flujos (erb).

Como el incremento utilizado en la discretización de la malla de cálculo ha sido de: $\Delta x = \Delta y = 4 \text{ m}$ y el incremento temporal $\Delta t = 0.27 \text{ s}$, por estabilidad del método numérico, el mínimo periodo de muestro es: $t_{min} = 2\Delta t$, lo que arroja una frecuencia de Nyquist o máxima frecuencia a considerar de valor:

$$f_N = f_{max} = \frac{1}{t_{min}}$$

se ha llevado a cabo con $2^{14} = 16384$ puntos lo que implica un incremento frecuencial de valor:

$$\Delta f = \frac{f_{max}}{2^{14}}$$

De este modo: $\Delta t = 0.27 \text{ s} \Rightarrow \Delta f = 0.000113028067 \text{ s}^{-1}$

De forma equivalente, teniendo en cuenta la relación entre amplitud de onda y densidad espectral, los espectros de respuesta se expresan, también, en términos del llamado coeficiente de amplificación, cociente entre la amplitud de onda calculada en un punto A_i , correspondiente a la frecuencia $f_i \in [f_m, f_M] = [0.002857, 0.05]$ en el rango de interés, y la amplitud de onda significativa del espectro de ruido blanco A_0 . El coeficiente de amplificación es precisamente:

$$\frac{A_i}{A_0} = \sqrt{\frac{S(f_i)}{S_0}}$$

La gráficas de amplificación se dan también en términos del periodo, $T_i = 1/f_i$, y así se presentan en este trabajo.

Dado que la energía por unidad de área en cada banda de frecuencias, $E = \rho g S(f) \Delta f$, es proporcional a la densidad espectral (ρ es la densidad del agua y g la constante gravitatoria), se analizan los máximos o picos del espectro calculado y las frecuencias (periodos) donde se alcanzan, que pudieran corresponder a algunas de las frecuencias propias (o periodos propios) de oscilación de la dársena o de la dársena y su entorno marítimo, donde se encuentra ubicado el punto de agua concreto.

En las figuras 8 y 9 pueden observarse los puntos analizados y las secciones consideradas entre los mismos a fin de analizar, a la largo de las mismas, los diferentes modos de oscilación que pudieran desarrollarse. La figura 8 corresponde a la situación actual y la 9 a la configuración futura con la dársena construida. Los puntos P4 y P5 en la configuración actual y los homólogos, P7 y P8 en la futura, corresponden a la playa de la Malagueta,

considerada como pared reflejante (condición de contorno en el establecimiento del problema de evolución).

En la figura 10 aparecen las gráficas de amplificación correspondientes a los puntos P1, P2, P3, P4, P7 y P8 en la configuración futura, en un detalle que abarca desde 20 s hasta 120 s, y donde aparece más destacado un periodo de aproximadamente 70 s que pudiera corresponder a un segundo modo transversal de oscilación entre la dársena y la playa, asimilando el entorno a una dársena rectangular de profundidad constante y de longitud entre paredes, aproximada, la distancia entre los puntos de la dársena y los de la playa.

En la figura 11 se incluyen las gráficas de amplificación correspondientes a la configuración actual y a los puntos P1, P2 y P4 (P7 en futura), y se observa como, también, destaca un periodo en torno de 70 s. El periodo en torno de 25 s con un máximo en la amplificación pudiera corresponder a un primer modo de oscilación transversal entre paredes (puntos P1 y P2) que desaparece en la configuración futura que contempla el cierre de la nueva dársena.

La fórmulas teóricas de oscilación transversal o entre paredes reflejantes utilizadas para seleccionar los posibles periodos propios de la dársena o de la dársena y su entorno, obedecen a las expresiones:

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gh}}, \quad \lambda_n = \frac{2L}{n}; \quad n = 1, 2, \dots$$

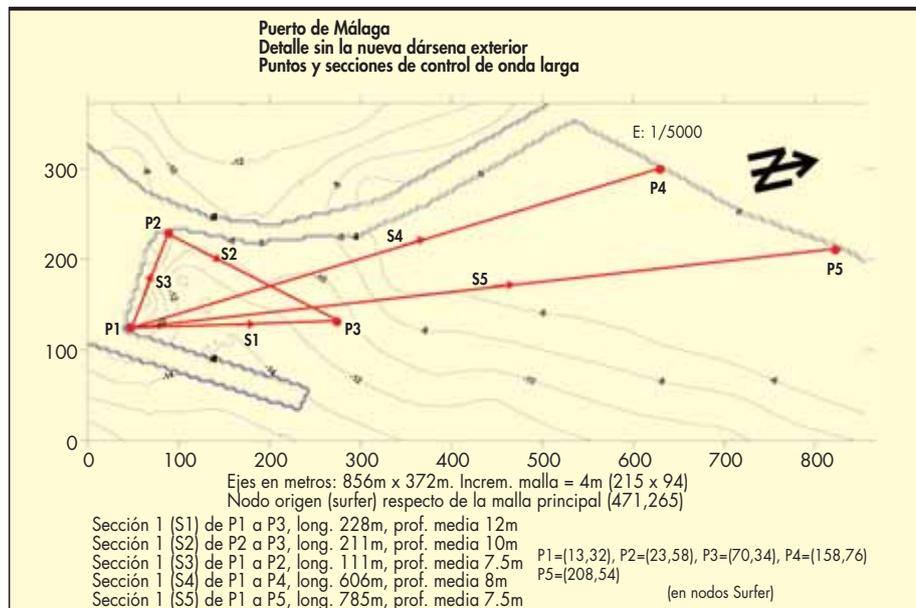
En estas fórmulas, L es la longitud entre paredes y h es la profundidad media del área considerado (constante). Para el armónico de orden n , de periodo T_n y de longitud de onda λ_n , el número de nodos interiores (elevación superficial nula y velocidad horizontal de partículas máxima) es, precisamente, n . En las paredes siempre aparecen antinodos (máxima elevación y velocidad de partículas nula).

Las fórmulas homólogas de oscilación longitudinal, o entre pared y borde abierto (a distancia L), son:

$$T_n = \frac{4L}{(2n-1)\sqrt{gh}}, \quad \lambda_n = \frac{4L}{2n-1}; \quad n = 1, 2, \dots$$

Para estos modos, en la pared siempre existe antinodo y nodo en el borde abierto. Para los modos de órdenes $n > 1$, el número de nodos interiores es $n - 1$.

FIGURA 8.



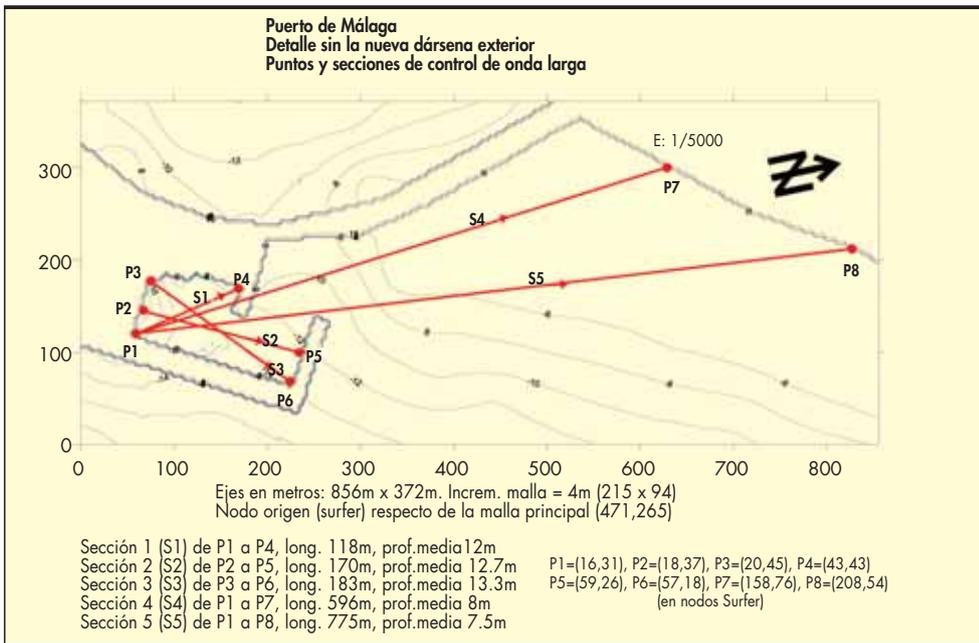


FIGURA 9.

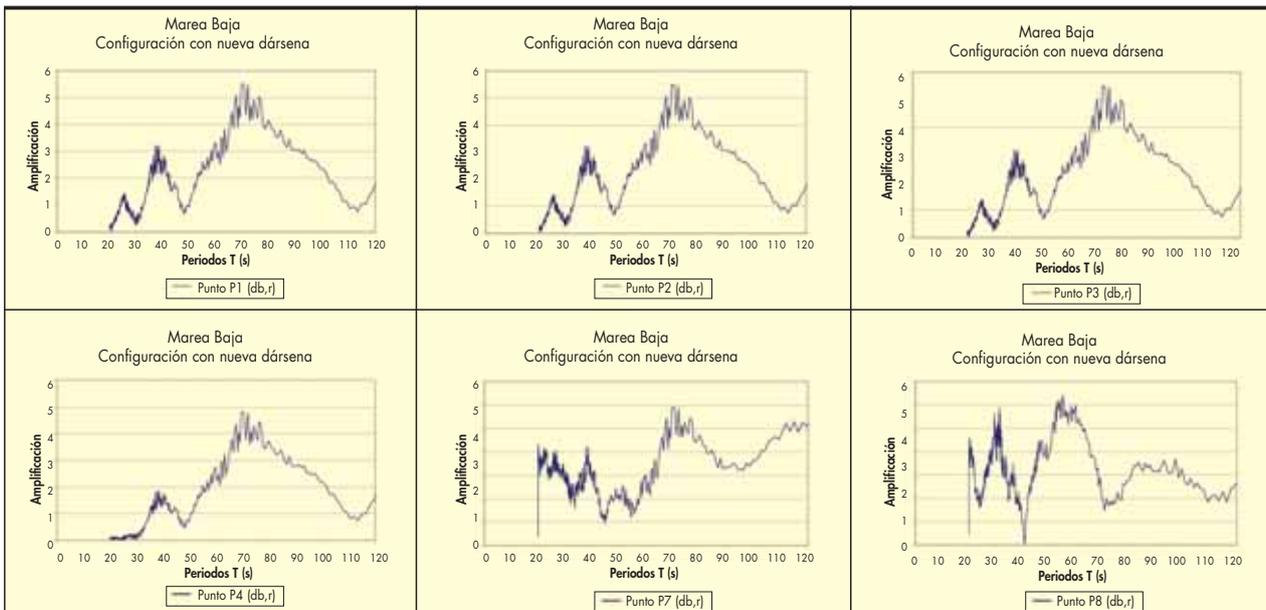


FIGURA 10.

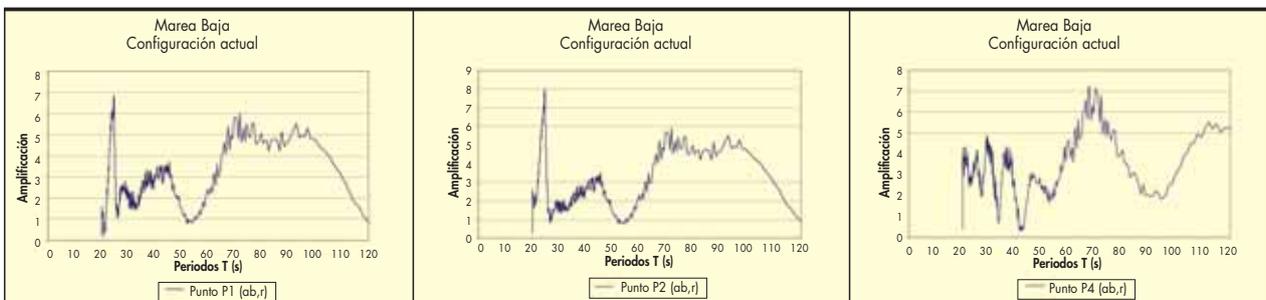


FIGURA 11.

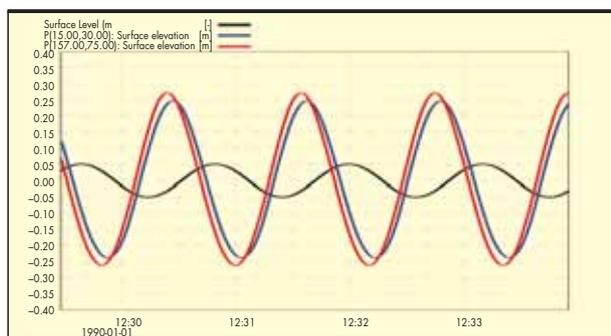


FIGURA 12.

2.1. ENSAYOS CON OLEAJE MONOCROMÁTICO

Se han realizado simulaciones numéricas con oleaje monocromático de periodo $T = 70$ s como el candidato, aproximado, con mayor probabilidad de ser un periodo con carácter resonante que se correspondería, de acuerdo con las fórmulas reseñadas, con un segundo modo de oscilación transversal entre la nueva dársena y la playa de La Malagueta. En la figura 12 aparece la serie temporal de elevaciones (detalle con tres ondas) a la entrada del modelo, con una amplitud de 0.05 m, y la series calculadas en los puntos P1 (fondo de la dársena) y P7 (playa de La Malagueta), con el desfase correspondiente. El resultado gráfico refleja la amplificación de la señal y confirma al periodo de 70 s como un segundo modo de oscilación transversal entre la dársena y la playa.

En la figura 13 aparecen las gráficas bidimensionales de oscilación de la lámina de agua para el periodo mencionado, separadas un semiperiodo en el tiempo. La figura 14 corresponde a la oscilación a lo largo de la sección 4 entre los pun-

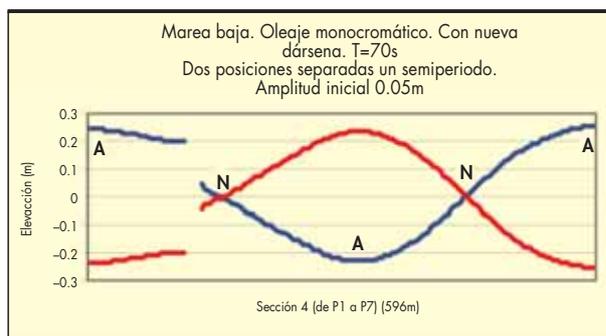


FIGURA 14.

tos P1 (fondo de la dársena) y P7 (playa de La malagueta) en las que se aprecian claramente los antinodos en los extremos y en el centro de la sección y los dos nodos interiores.

El salto o discontinuidad que se observa en las gráficas de la figura 14 se corresponde con el paso por tierra (contra-dique de la dársena) de la sección 4 (figura 9).

2.2. ENSAYOS NUMÉRICOS CON OLEAJE REAL

A fin de comprobar si los oleajes reales de la zona desarrollan algún periodo, asociado a las ondas de grupo, en el entorno de 70 s, se han realizado, así mismo, ensayos numéricos tomando como oleaje de entrada las series de elevaciones de la superficie libre de dos temporales procedente del sector Este y medidos por la boya de Málaga de la red costera, fon-deada a 22 m, que es, precisamente, la máxima profundidad considerada en la modelación. La duración de ambas series (figura 15), es de 43 minutos aproximadamente y sus características espectrales (T_p periodo de pico, $H_{z,s}$ altura signifi-

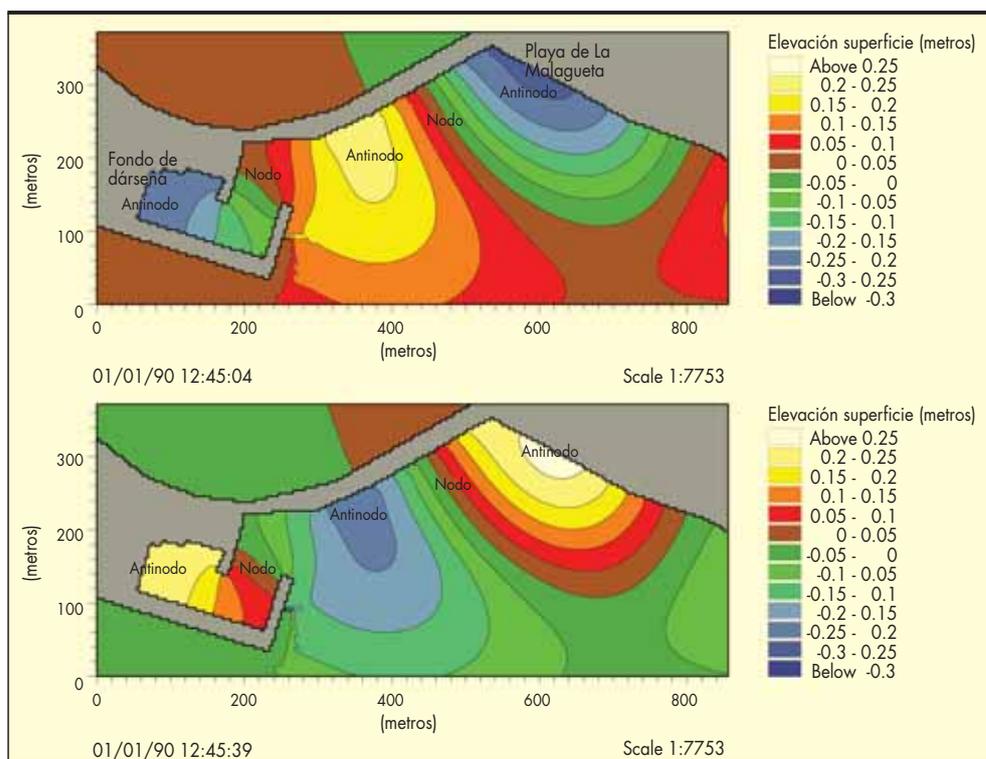


FIGURA 13.

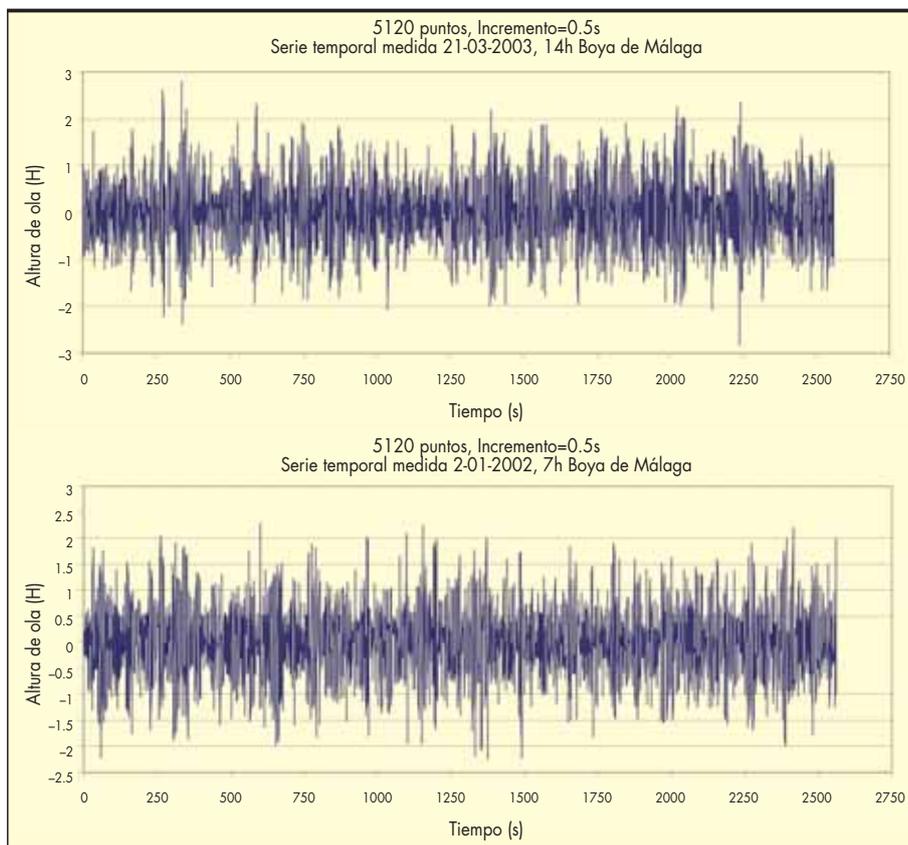


FIGURA 15.

cante, $H_{z,m}$ altura máxima y $H_{z,sD}$ altura media de *set down*), son:

Serie 21-03-2003, 14h: $T_p = 8.0$ s, $H_{z,s} = 2.81$ m, $H_{z,m} = 5.16$ m, $H_{z,sD} = 0.112$ m
 Serie 2-01-2002, 7h: $T_p = 9.1$ s, $H_{z,s} = 2.85$ m, $H_{z,m} = 4.24$ m, $H_{z,sD} = 0.119$ m

Para la aplicación del modelo de evolución, las series reales de entrada se han discretizado, nuevamente, con un paso temporal menor al de medida, $\Delta t = 0.07$ s, con lo que el número de pasos en el tiempo, durante la simulación numérica, ha sido de 36564. Se han utilizado, además, las ecuaciones extendidas de Boussinesq, que amplían el rango de aplicabilidad de las ecuaciones hasta la relación entre profundidad y longitud de onda $h/L < 0.5$, que cubre la presencia de periodos del orden de 6 s, a una profundidad máxima de 22 m en el área modelada. La duración de estos ensayos (≈ 43 min), ha permitido un análisis posterior de las series temporales calculadas en los puntos de referencia y la obtención de los espectros asociados. En la figura 16 se incluyen, como muestra, tres series temporales calculadas en los puntos P1 y P2 (fondo de la dársena) y en el punto P7 (playa de la Malagueta), en el caso de considerar como oleaje de entrada el correspondiente a la serie del 2-01-2002 a las 7 h.

Los resultados gráficos con los espectros calculados, en términos de periodos, en los mencionados puntos, quedan reflejados en la figura 17 para la serie temporal de entrada del 21-03-2003 a las 14 h y en la figura 18 para la serie del 2-01-2002 a las 7 h. El rango, en periodos, considerado en todas las gráficas abarca desde 20 s hasta 300 s y las dos simulaciones numéricas, con oleaje real, corresponden a la configuración que contempla la futura dársena exterior o de Levante.

En todos los espectros se observa como destaca, para los dos temporales considerados, un periodo en torno de los 80 s que podría asimilarse al periodo aproximado de 70 s, detec-

tado en los ensayos teóricos (con el oleaje sintético obtenido a partir del espectro de ruido blanco).

Estos últimos resultados parecerían confirmar que un periodo en el entorno de los 70-80 s, podría suponer la aparición de un fenómeno de onda larga o de resonancia para la futura dársena, con el diseño en planta proyectado y su orientación frente a la playa de La Malagueta. En cualquier caso, sería de interés el poder comparar, una vez concluida la obra de cierre de la dársena, los espectros correspondientes a las series temporales medidas en los puntos de referencia, (mediante sensores de presión instalados junto a las paredes donde se ubican dichos puntos), con los espectros calculados a partir del oleaje real, a la entrada al modelo, que correspondiera al tiempo de la toma de datos.

3. CONCLUSIONES

La determinación de posibles fenómenos de resonancia en dársenas, asociados a la presencia de ondas largas en el área marítima de la zona en cuestión puede ser abordada de forma razonable a partir de las ecuaciones de Boussinesq y el planteamiento de un problema de evolución con condiciones iniciales y condiciones de contorno adecuadas que reflejen, éstas últimas, del modo más realista posible, las características reflejantes de las estructuras marítimas y de la línea de costa contempladas en el área de estudio.

La resolución numérica de las ecuaciones que rigen el problema mediante el método de diferencias finitas, con incrementos en el espacio y el tiempo que garanticen la estabilidad del método y por tanto su convergencia, resulta ser una buena herramienta en la determinación teórica de los posibles periodos con posible carácter resonante, partiendo del oleaje sintético generado a partir de un espectro de ruido blanco

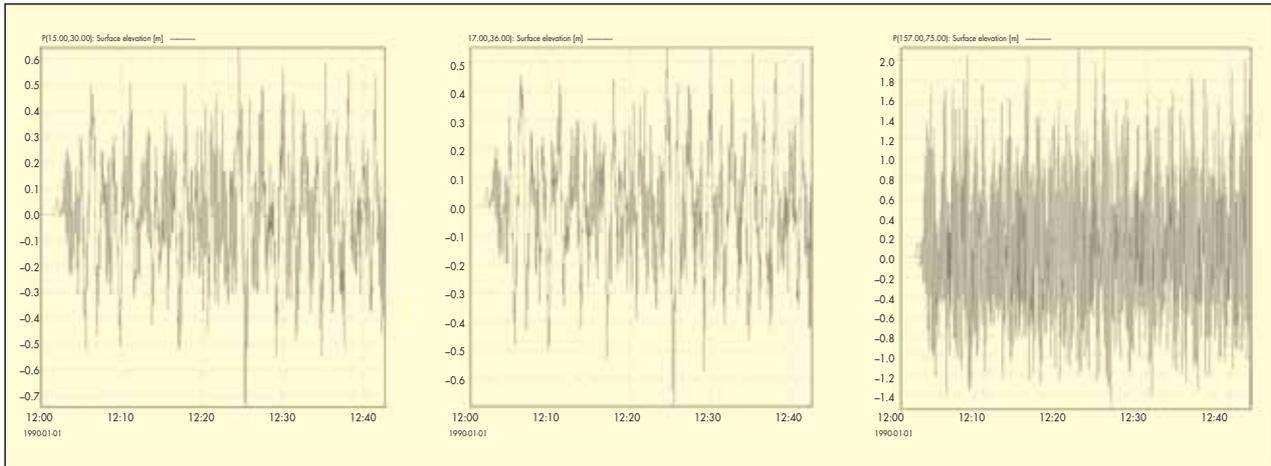


FIGURA 16. Series temporales calculadas en los puntos P1, P2 y P7.

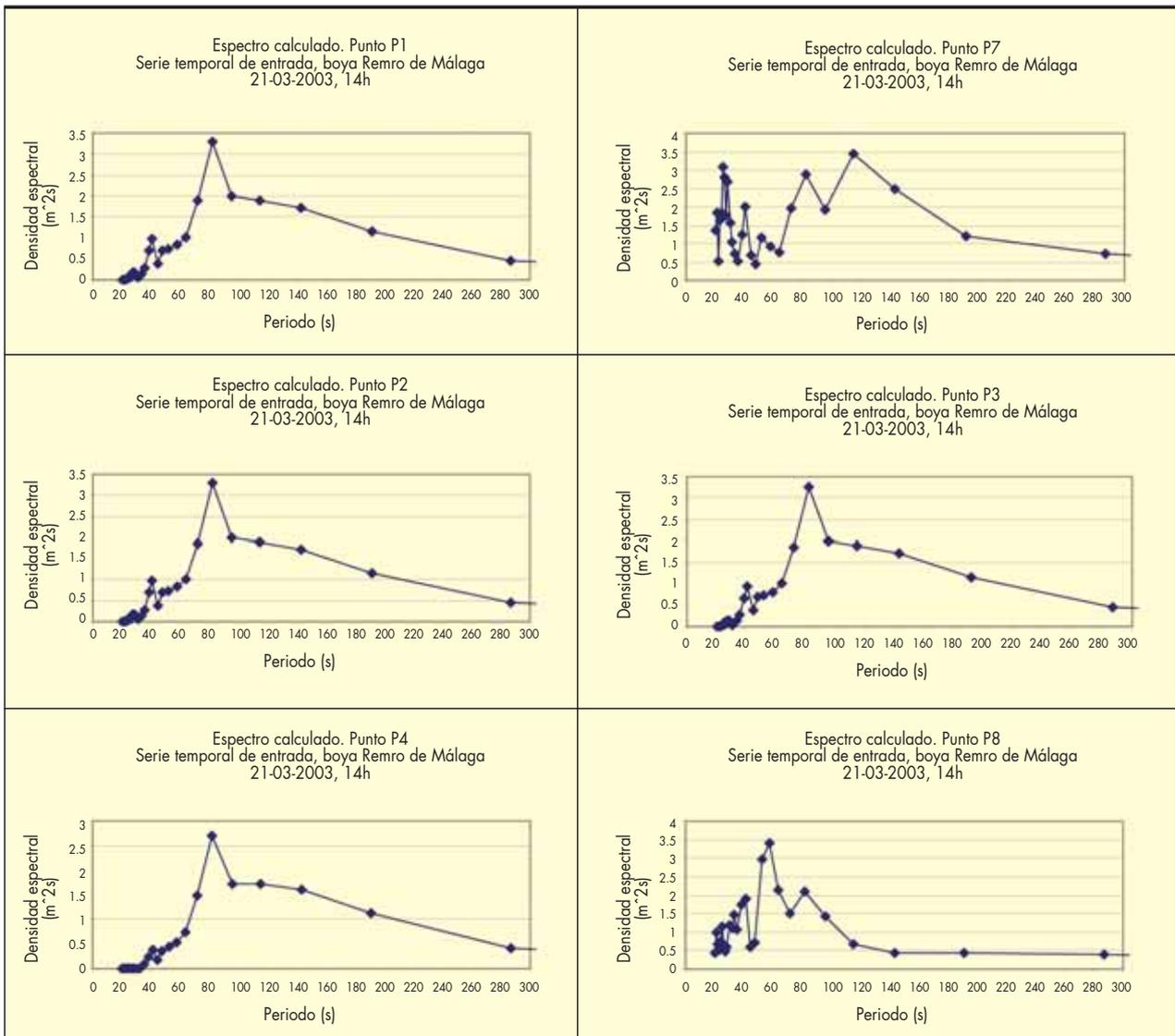


FIGURA 17. Espectros calculados a partir de las series temporales de elevaciones de la superficie libre, en los puntos: P1, P2, P3 y P4 de la dársena, y P7 y P8 de la playa de La Malagueta, correspondientes al oleaje, a la entrada del modelo, del día 21-03-2003 a las 14h.

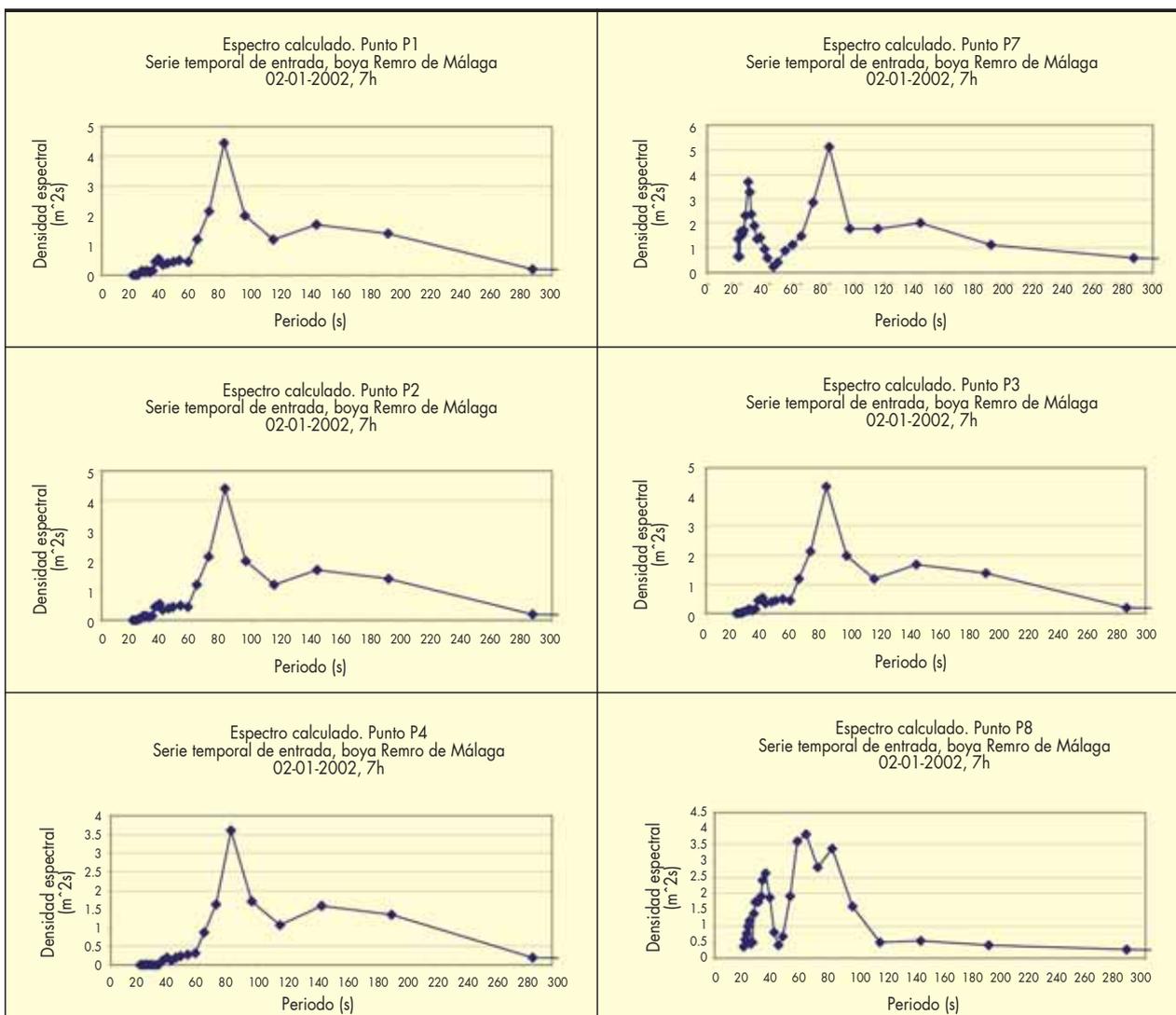


FIGURA 18. Espectros calculados a partir de las series temporales de elevaciones de la superficie libre, en los puntos: P1, P2, P3 y P4 de la dársena, y P7 y P8 de la playa de La Malagueta, correspondientes al oleaje, a la entrada del modelo, del día 2-01-2002 a las 7h.

Ensayos numéricos con oleaje regular de periodo, o periodos, detectado en el análisis previo, ayudan a verificar dicho carácter resonante, previa estimación teórica de los periodos propios de las estructuras envueltas. En el caso aquí estudiado la resonancia puede aparecer entre la nueva dársena y la playa.

Es importante concluir que la realización de simulaciones numéricas con oleajes reales de la zona, es fundamental a la hora de verificar si el periodo o periodos de onda larga detectados de forma teórica, pueden, verdaderamente, desarrollarse en la zona marítima que se analiza.

Por último, añadir que el estudio presentado ha tenido un carácter especulativo desde el momento en que la obra analizada no está construida. En otros casos, la presencia de ondas larga en dársenas ha sido detectada a partir de medidas efectuadas en las paredes de las estructuras presentes o por movimientos bruscos de buques atracados. La modelación numérica, tal y como aquí se ha planteado, ayuda a confirmar el fenómeno detectado y proporciona una buena herramienta para analizar posibles configuraciones alternativas tales como: cambios en la geometría en planta

del área de estudio, obras externas de abrigo o interiores, dragados y otras; todas ellas encaminadas a resolver dicho fenómeno, eliminando el periodo o periodos de onda larga o reduciendo su contenido energético.

4. AGRADECIMIENTOS

A todo el sector de estudios portuarios del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.

5. REFERENCIAS

Bowlers, E.C., 1980, Long period disturbances due to wave groups. Conf. Coastal Eng., 610-623.
 García Mañes, M. Informe del CEDEX sobre un estudio de onda larga para el cierre de la dársena de Levante del Puerto de Málaga. Abril, 2006.
 Watson, G., Barnes, T.C.D. and Peregrine, D.H., 1994, The generation of low-frequency waves by a single wave group incident on a Beach. Conf. Coastal Eng., 776-789.