

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 8
MODELADO NUMÉRICO DE UN CASO REAL

8.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se pudo ver cómo la utilización de un modelo numérico avanzado de oleaje basado en las ecuaciones modificadas de Boussinesq, puede llegar a convertirse en una herramienta que mejore sustancialmente las técnicas tradicionales de abordar el estudio del fenómeno de la resonancia portuaria. Se observó también que las simulaciones numéricas de los casos de laboratorio mostrados, aportan un nuevo enfoque en el estudio de los procesos físicos de las ondas y su transformación bajo episodios resonantes.

Sin embargo, las hipótesis simplificadoras de diseño en el modelo físico hacen que las simulaciones numéricas hereden dichas simplificaciones y, por consiguiente, nos alejemos irremediabilmente de la visión integral que el prototipo conserva, así como de la problemática que conlleva realizar simulaciones numéricas de un caso real.

Por ello, el objetivo primordial de este capítulo, es intentar demostrar que es factible incluir el uso de un modelo numérico de ondas largas de este índole, dentro del bagaje de herramientas básicas para acometer cualquier estudio de resonancia portuaria real en la ingeniería portuaria.

Para este fin se ha seleccionado la zona portuaria de Ciutadella y Platja Gran situada en la costa Oeste de la isla de Menorca en las Islas Baleares, que históricamente han presentado complejos episodios de resonancia portuaria con características importantes de no linealidad y de acoplamiento entre dársenas.

Se eligió esta zona de estudio debido principalmente a los importantes episodios de resonancia que han sido registrados durante la campaña de medición LAST-97, que representan una gran aportación al estudio del fenómeno de resonancia generado por mecanismos relacionados con fluctuaciones atmosféricas que suceden anualmente en la zona de las Islas Baleares.

A pesar de que dichas oscilaciones resonantes generadas por fluctuaciones atmosféricas no representan un mecanismo forzador habitual en la naturaleza, las mediciones obtenidas durante la campaña LAST-97 lograron la difícil tarea de capturar una respuesta resonante ideal, consiguiendo medir factores de amplificación importantes, pocas veces registrados en campo, y que se consideran idóneos para la validación del modelo numérico en condiciones de resonancia reales.

Además, la elección de la zona de estudio se vio condicionada por las ventajas geométricas que ésta presenta, tomando en cuenta que, de forma general, el trabajo de escalado del prototipo hacia el modelo numérico puede tornarse en una tarea complicada o computacionalmente exigente, especialmente a la hora de implementar las series medidas de onda larga para su generación numérica dentro el dominio computacional, debido a que éste se diseña en función de las características frecuenciales de los registros temporales, buscando que el dominio numérico sea representativo de todas las oscilaciones del registro de entrada y de las posibles transferencias energéticas entre componentes frecuenciales.

La series de onda larga medidas durante la campaña LAST-97, permiten diseñar mallas numéricas menos exigentes computacionalmente (comparadas con aquellas diseñadas para representar las oscilaciones de onda corta), que permiten realizar simulaciones eficientes en el tiempo con un coste computacional moderado.

Cabe mencionar que la elección de la zona portuaria de Ciutadella y Platja Gran, radica en la necesidad de contar con series medidas en campo que registren las características resonantes variables en el tiempo (efectos transitorios), que presenten diversos grados energéticos de oscilación dentro y fuera de los puertos, que manifiesten condiciones de acoplamiento geométrico entre dársenas, que presenten efectos no lineales del flujo, y que alcancen importantes factores de amplificación resonante.

Los episodios resonantes registrados en las calas de Ciutadella y Platja Gran, eventualmente han generado variaciones del nivel del mar de amplitud extraordinaria dentro de las dársenas portuarias, forzadas desde el exterior por oscilaciones de génesis atmosférico conocidas como rissagas, llegando a causar daños considerables tanto en la infraestructura de los puertos, como en las embarcaciones amarradas.

El capítulo se organiza de la siguiente manera:

En el segundo punto se presenta una breve descripción de la zona de estudio, y las características de la campaña de campo de toma de datos denominado LAST-97, los equipos utilizados y las características de los registros obtenidos.

Posteriormente, en el apartado tercero se presenta un resumen sobre los estudios previos existentes para la caracterización de las oscilaciones del nivel del mar en la zona, así como una síntesis de las modelaciones matemáticas realizadas y las características de los resultados obtenidos.

En el cuarto punto se presenta el trabajo de adaptación y análisis de las series de oscilaciones de superficie libre seleccionadas para las simulaciones numéricas.

En el quinto apartado se muestra el diseño del dominio numérico y la malla en elementos finitos.

En el sexto apartado se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas y las comparaciones obtenidos con las series medidas en campo, mostrando las capacidades del modelo y ventajas con respecto a modelos numéricos tradicionales.

Finalmente, en el último apartado se incluyen algunas conclusiones.

8.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y CAMPAÑA DE CAMPO

8.2.1 Zona de la zona de estudio

El puerto de Ciutadella y la cala de Platja Gran se encuentran enclavados en la costa Occidental de la Isla de Menorca, Islas Baleares. Ambos lugares se asientan de forma natural a lo largo de dos bocanas que se abren paso hacia tierra firme, definiendo por un lado al puerto mediterráneo de Ciutadella, el cual alberga importantes actividades comerciales y deportivas en sus aproximadamente 1.2 km de longitud, 200 m de anchura y 10 m de calado en la bocana, concentrando una gran actividad turística en sus alrededores, vease figura 8.1. Por otro lado y de forma similar, pero en este caso con una longitud de cerca de 0.7 km, se encuentra la cala de Platja Gran al sur de la cala de Ciutadella, en la que se sitúa una playa urbana de carácter lúdico con gran desarrollo comercial.



Figura 8.1 Fotografía del puerto de Ciutadella. Aerografía del Litoral, Menorca.

Si se observa la carta náutica en la figura 8.2, se puede verificar que la costa Occidental de la isla presenta diversas canalizaciones naturales o calas que irrumpen en la continuidad de la costa Menorquina, con longitudes predominantes sobre los calados $L_m \gg h_m$ y sobre las anchuras $L_m \gg w_m$, haciendo que la dinámica de los procesos asociados al oleaje tienda a la unidireccionalidad a lo largo de dichas formaciones naturales.

En la figura 8.2 se aprecian la cala Forcat y cala Blanes al Oeste de Ciutadella, la Cala de Frares situada en la bocana del puerto, la cala del Degollador (Platja Gran), y las calas Santandria y Cala Blanca ambas al sur de Platja Gran, así como los contornos costeros de la zona de estudio que se conforman de material rocoso prácticamente en su totalidad, integrando de esta manera una línea de costa definida por acantilados verticales.

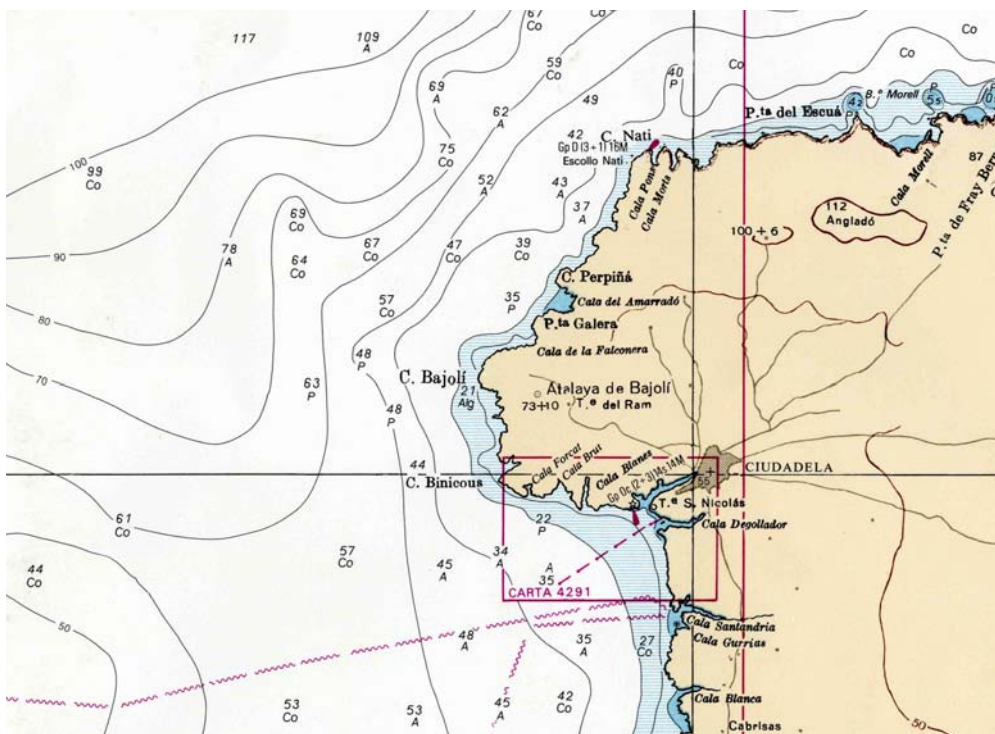


Figura 8.2 Carta náutica 6A, sección occidental de la costa Menorquina.
 Instituto Hidrográfico de la Marina

El fondo es arenoso prácticamente en su totalidad, con líneas batimétricas que adoptan paulatinamente el contorno de la costa. Las sondas batimétricas guardan una pendiente suave, situando los 30 m de profundidad a 15 km medidos desde la bocana de Ciutadella.

La cala de Ciutadella presenta un fondo con una sección aproximadamente trapezoidal, con 10 m de profundidad desde el exterior de la bocana hasta aproximadamente alcanzar 2 m en su parte final. La cala de Platja Gran muestra una pequeña isla llamada Illot de sa Galera, situada justo en el inicio de la bocana, promoviendo que el canal pierda calado rápidamente, y que alcance un fondo somero desde la segunda mitad de su longitud hasta el final de la cala en la que se asienta la playa.

8.2.2 Descripción de la campaña LAST-97

En 1997 una extensa campaña de campo fue llevada a cabo para ahondar en el estudio de la resonancia inducida por ondas generadas por perturbaciones de la presión atmosférica.

La campaña de campo fue llevada a cabo por el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados de la Universidad de las Islas Baleares IMEDEA, y el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria GIOC, bajo el marco del proyecto CYTAMAR MAR95-1863 durante los meses de junio, julio y agosto de 1997.

Con la campaña se pretendió contar con registros suficientemente largos de oscilaciones de onda larga y de presión atmosférica, medidos de forma simultánea en diversos puntos situados en la plataforma externa a la zona de Ciutadella, así como en el interior de las dos calas de estudio.

Las medidas simultáneas del nivel del mar a través de la utilización de sensores de presión, permitieron conformar un completo dominio de acción que comprendía cuatro sensores habilitados en la plataforma continental externa a las calas, dos sensores ubicados dentro de la cala de Ciutadella y un último sensor posicionado en la cala de Platja Gran. El Instituto Español de Oceanografía permitió la utilización de un sensor de

marea permanentemente en funcionamiento en la bahía de Palma de Mallorca. Adicionalmente, tres micro-barógrafos midieron simultáneamente las variaciones de la presión atmosférica en el área de las Islas Baleares. La figura 8.3 muestra la disposición espacial de los sensores de presión y los códigos asignados a cada uno, nomenclatura que se respetará en este capítulo.

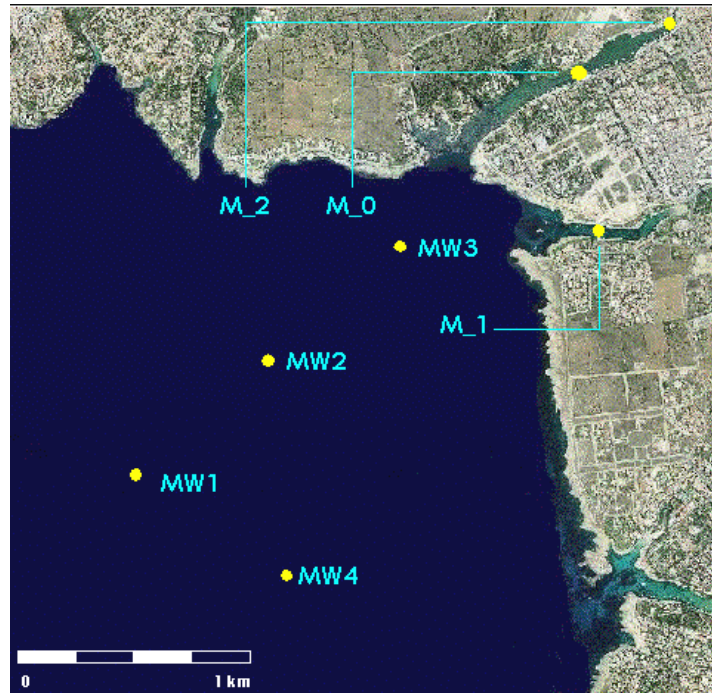


Figura 8.3 Disposición de los sensores de presión, campaña LAST-97.

Todos los sensores fueron sincronizados con fecha de inicio del 2 de junio de 1997 para medir simultáneamente y con una frecuencia de 1 dato por minuto ininterrumpidamente hasta el 30 de agosto de 1997. La disposición espacial de los sensores permite la obtención de la amplitud, celeridad y dirección de las ondas que se propagan en la zona.

Durante la campaña de campo, se identifican diversos episodios de oscilaciones de onda larga por perturbaciones atmosféricas durante las mediciones de la superficie libre, observándose pequeños grupos bien definidos de ondas sensiblemente más energéticas con respecto al total de los registros temporales, consiguiéndose así, el día 24 de julio, la identificación de un evento relevante con duración de 10 horas y alturas de onda de hasta 170 cm en la bocana del puerto de Ciutadella.

En la figura 8.4 se muestran los registros completos de superficie libre para los siete sensores utilizados en la campaña LAST-97, indicando en la tabla 8.1 las localizaciones geográficas en coordenadas UTM y las profundidades de posición de cada sensor.

Sensor	x (UTM)	y (UTM)	h (m)
MW1	569103	4426511	36.6
MW2	569822	4426999	28.2
MW3	570244	4427504	19.5
MW4	569753	4426073	34.5
M_1	571115	4427552	4
M_0	571013.824	4428257.97	1.6
M_2	571407.127	4428472.782	1.7

Tabla 8.1 Localización de los sensores y sus calados

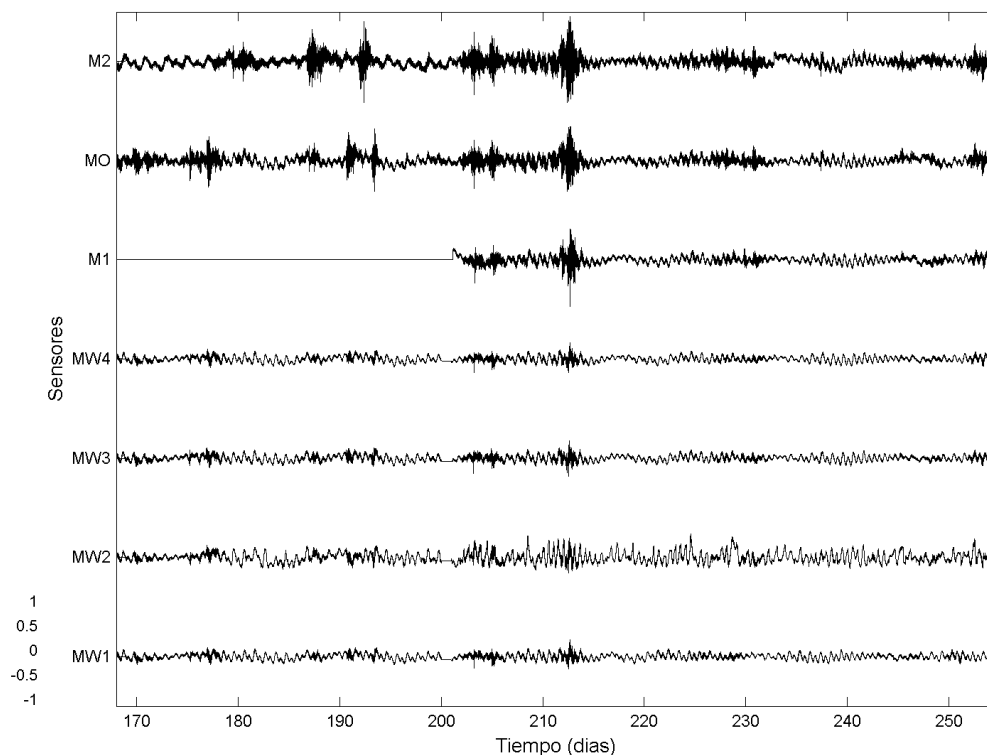


Figura 8.4 Registros completos de superficie libre para los siete sensores utilizados en la campaña LAST-97.

Los resultados obtenidos presentan claramente episodios energéticos de ondas agrupadas en paquetes de corta duración (1 día aproximadamente), íntimamente relacionados con fluctuaciones atmosféricas en la zona.

El evento de rissaga de alta energía registrado el 24 de julio de 1997 (figura 8.4, $t=213$ días), es de especial interés por las altas amplificaciones de cerca de 2 m que registraron los sensores dentro de las calas de Ciutadella y Platja Gran. Sin embargo, se puede observar en la figura 8.4 que también existen registros que muestran episodios más o menos constantes (7 a 10 días), de poca y media energía con respecto al evento de rissaga antes mencionado.

El sensor M1 comenzó a medir únicamente a partir del día 12 de julio de 1997 debido a desperfectos en la instalación y en la batería.

8.3 ESTUDIOS PREVIOS

8.3.1 Referentes a las oscilaciones de largo periodo observadas en las Islas Baleares

Es importante hacer referencia a los estudios existentes en la literatura, sobre los forzamientos físicos que fomentan los episodios resonantes en las Islas Baleares, particularmente en el puerto de Ciutadella, Menorca.

Las oscilaciones sobre-amplificadas que históricamente se han observado en algunas calas costeras de la Isla de Menorca, coinciden claramente con episodios de variación atmosférica importante (± 1 mbar), registradas en las inmediaciones del Mediterráneo Occidental.

Montserrat *et al.* (1991) determinó que existe una gran correlación entre la generación de ondas largas de origen atmosférico y las oscilaciones resonantes en dichas calas.

En la última década, diversos estudios se han encargado de caracterizar el origen y comportamiento de las ondas largas existentes en la región Balear, como posibles elementos forzadores de las oscilaciones resonantes dentro de las calas. Gomis *et al.* (1993), y Garcies *et al.* (1996) presentaron estudios que correlacionan acertadamente las variaciones atmosféricas que ocurren en verano en el Mediterráneo, con ciertas oscilaciones extraordinarias del nivel del mar, que a su vez sirven como elemento forzador de las oscilaciones sobre-amplificadas en las calas circundantes, conocidas como fenómeno de rissaga.

A través de la recopilación de diversos registros simultáneos de oleaje y presión atmosférica, los autores han asociado las variaciones temporales y espaciales de los registros atmosféricos de presión directamente con pequeñas variaciones en el nivel medio del mar, que llegan a excitar las calas en la costa, convirtiéndolas en osciladores armónicos simples en resonancia, siempre y cuando los periodos que adoptan dichas oscilaciones correspondan con los modos de oscilación naturales de las bocanas.

Además de la caracterización de las ondas atmosféricas y su relación con las rissagas, existen trabajos adicionales que caracterizan a otras ondas largas que co-habitan en el área de Baleares, ondas que han sido registradas sistemáticamente en diversas campañas de campo, y que han mostrado ciertos efectos de transferencia energética entre frecuencias bajo la presencia de algún episodio de rissaga.

Con referencia a lo anterior, Liu *et al.* (2002) muestran un estudio que intenta demostrar el origen y la posible influencia en los efectos resonantes en Ciutadella, de dos frecuencias de oscilación particularmente energéticas observadas dentro de los espectros de energía obtenidos en dos puntos diferentes de Palma de Mallorca y en Menorca respectivamente.

La utilización de un modelo analítico de ondas de borde (edge waves) inducidas por cambios en la presión atmosférica, permitió a los autores verificar que dichas concentraciones frecuenciales de energía pertenecen a un sistema de ondas de borde de 32 min que circunda la isla de Mallorca, y que interactúa con una oscilación de 24 min que se manifiesta entre las plataformas de Menorca y Mallorca, siendo esta última la que tiende a acoplarse con la onda generada por las variaciones atmosféricas durante las rissagas por coincidencia entre sus celeridades, motivando así un intercambio energético entre la onda Inter-isleña y la onda de rissaga.

Finalmente, dentro de la caracterización de la zona de estudio Liu *et al.* (2003), presentaron una caracterización de los periodos resonantes en diversos puntos dentro y fuera del Puerto de Ciutadella y Platja Gran a través del análisis de extensos registros de superficie libre medidos en la campaña de campo LAST-97, estableciendo los modos principales y secundarios de oscilación de ambas calas, para un sistema de dos calas acopladas.

8.3.2 Estudios previos referentes a las simulaciones numéricas del Puerto de Ciutadella

La transformación de las ondas largas en la región Occidental de Menorca, ha sido examinada tomando en cuenta diversos criterios matemáticos e hipótesis simplificativas que han permitido abordar la compleja problemática del fenómeno con cierta facilidad.

Inicialmente, Liu *et al.* (2003) presentaron una solución analítica basada en un sistema lineal de ecuaciones resueltas sobre diferentes dominios físicos bien diferenciados con base en las características físicas de las ondas en cada zona, estableciendo una serie de ecuaciones acopladas para la zona de oleaje exterior, para el dominio de radiación de ondas cercano a las bocanas portuarias, y para el dominio en el interior de los puertos.

Para poder representar la complejidad geométrica del Puerto de Ciutadella y la cala de Platja Gran con un modelo analítico simple, los autores establecieron fuertes hipótesis simplificativas referentes a la geometría de la zona de estudio. Las calas naturales fueron idealizadas en dos canales portuarios rectangulares y paralelos, estrechos, y de profundidad constante, separados por una distancia dada, guardando siempre la relación de escala con las dimensiones reales, en la medida de lo posible.

En el estudio se determinó una longitud de 1000 m para el canal que emula a la cala de Ciutadella, de 500 m para el canal correspondiente a Platja Gran, una distancia de 250 m entre los ejes de simetría de los canales portuarios, y una profundidad constante en todo el dominio de 5.5 m.

Se estudiaron diferentes combinaciones geométricas entre bocanas con el modelo analítico lineal, logrando establecer las diferencias entre los coeficientes de amplificación de un sistema portuario simple y un sistema portuario acoplado. La figura 8.5 muestra los coeficientes de amplificación que se obtienen con el modelo analítico lineal para las combinaciones entre el sistema acoplado de bocanas, comparadas con una sola bocana abierta.

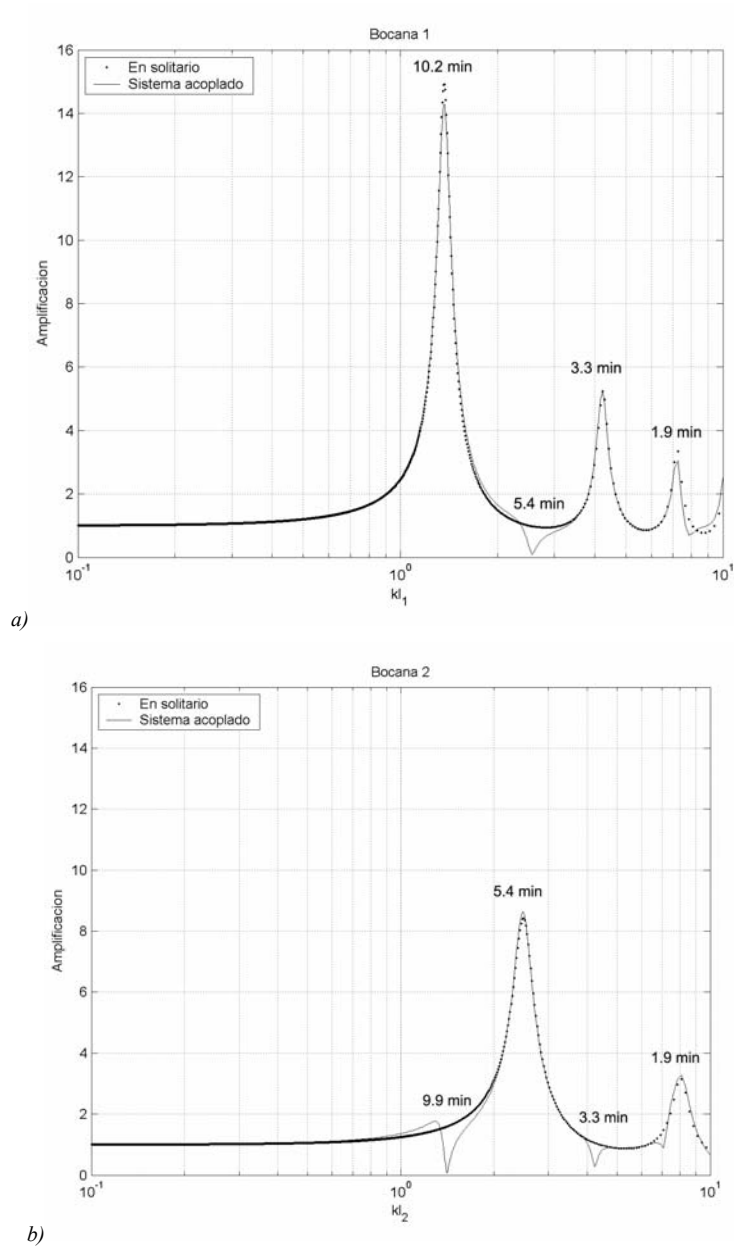


Figura 8.5 Factores de amplificación para dos bocanas acopladas, a) bocana 1 (Ciutadella) y b) bocana 2 (Platja Gran).

La obtención de los factores de amplificación para el sistema acoplado que conforman las dos bocanas permite, por un lado, identificar los modos resonantes fundamentales y naturales de cada bocana y, por otro, el poder distinguir los importantes efectos del acoplamiento entre canales cuando ambos trabajan conjuntamente.

En la figura 8.5, los efectos resonantes encontrados al considerar un sistema acoplado de dos bocanas adyacentes se observa claramente, presentando una deformación en la curva de respuesta de amplificación de cada puerto para aquellos picos resonantes del puerto contiguo. Además, las magnitudes de cada respuesta resonante se hacen levemente más estrechas por la presencia del puerto adyacente.

Se observa que los modos resonantes fundamentales para las calas de Ciutadella y Platja Gran (de $T=10.2$ min, y de $T=5.4$ min respectivamente), y los modos de oscilación de $T=3.3$ min y de $T=1.9$ min, se ven afectados por el acoplamiento geométrico entre dársenas adyacentes.

El modelo analítico propuesto por Liu *et al.* (2003) identifica con buena precisión el valor de las frecuencias resonantes comparadas con los factores de amplificación obtenidos directamente de los datos medidos durante la campaña LAST-97, mostrados en la figura 8.6. Sin embargo, debido a las simplificaciones señaladas y a que se trata de un modelo lineal sin términos disipativos, los resultados se ven limitados y divergen de la complejidad del fenómeno real, subestimando los valores reales de amplificación.

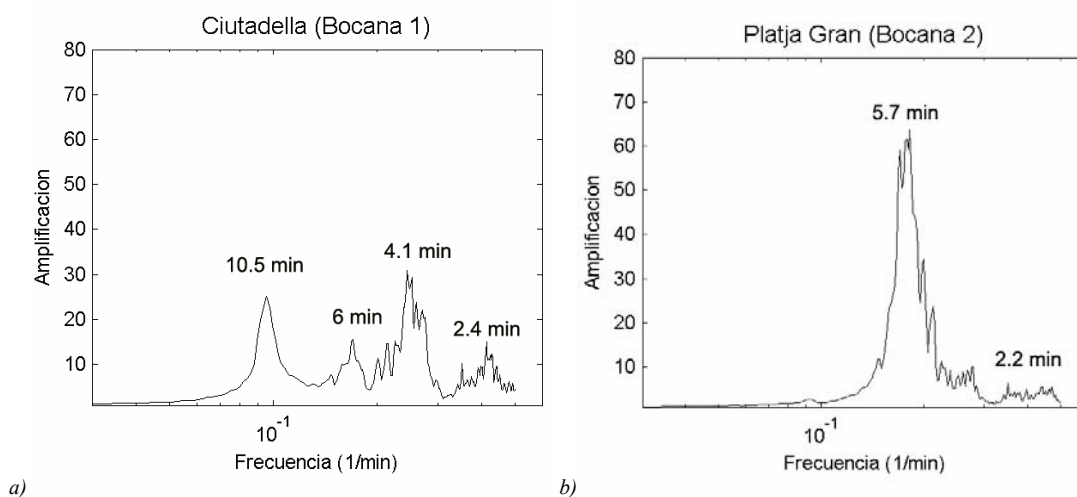


Figura 8.6 Factores de amplificación para las bocanas 1 y 2, medidos en la campaña LAST-97. a) Ciutadella (bocana 1), b) Platja Gran (Bocana 2).

Por esto, la búsqueda y selección de modelos numéricos cada vez más avanzados ha sido una constante dentro del análisis del fenómeno de resonancia en Ciutadella y Platja Gran.

Como se pudo ver en el capítulo segundo, en la descripción del estado actual de conocimiento referente a la modelación numérica del fenómeno de resonancia portuaria, existe una familia de modelos numéricos, a los cuales la ingeniería de costas ha dedicado especial atención a la hora de acometer la problemática del fenómeno de resonancia portuaria, enfocando sus esfuerzos en el desarrollo numérico de modelos de ondas basados en las ecuación elíptica de la pendiente suave (*elliptic mild-slope equations*).

La implementación de este tipo de modelos para identificar las amplificaciones y frecuencias resonantes en los puertos, se ha extendido ampliamente dentro de la comunidad científica en los últimos años.

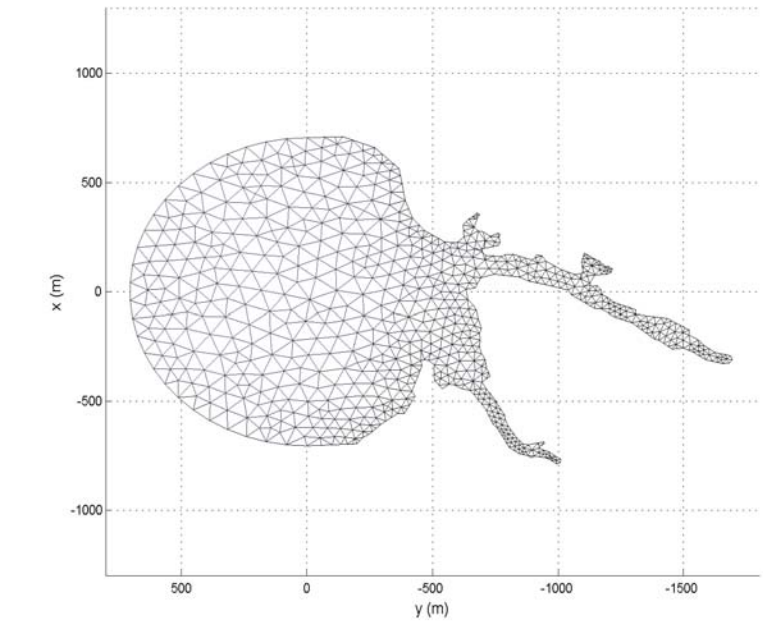
El Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos ha desarrollado un modelo en elementos finitos denominado MSP, GIOC (1999), que resuelve la forma elíptica de la ecuación de la pendiente suave para oleajes monocromáticos o espectrales, considerando los efectos de disipación de energía por fondo, existencia de contornos con reflexión parcial del oleaje, y efectos de radiación de oleaje hacia el exterior del dominio numérico.

Este modelo, en el límite de profundidades reducidas, es equivalente a un modelo de onda larga lineal y, por tanto, apropiado para el estudio de resonancia portuaria.

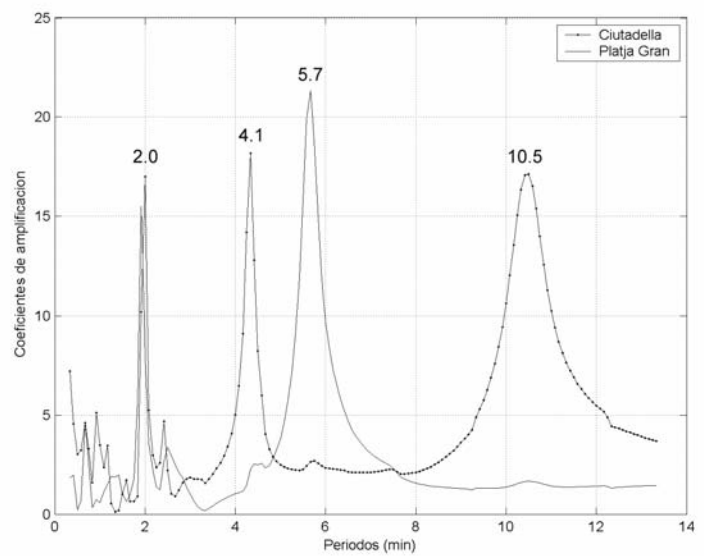
En GIOC (2004), se aplica el modelo numérico MSP a la zona Balear, a fin de poder identificar las diferentes frecuencias resonantes que existen de manera inherente en el sistema portuario Ciutadella-Platja Gran, tanto para su condición geométrica original, como para diversas actuaciones de ampliación y protección, dentro y fuera del puerto de Ciutadella. El modelo es alimentado con una serie ascendente de periodos en forma de ruido blanco, consiguiendo localizar aquellos valores frecuenciales en los cuales el sistema portuario entra en resonancia.

La identificación de las frecuencias resonantes dentro de las dos calas obtenidas con el modelo MSP para la situación portuaria original, muestran una gran similitud con las frecuencias correspondientes a los modos de oscilación obtenidos con las series temporales medidas, encontrándose que los periodos de 10.2 min, 4.2 min, y 1.9 min corresponden a los modos de oscilación del puerto de Ciutadella, y que los periodos de

5.4 min y 1.9 min son los modos de oscilación en la cala de Platja Gran, mostrados en la figura 8.7.



a)



b)

Figura 8.7 a) Malla en elementos finitos para el modelo MSP, b) Coeficientes de amplificación para Ciutadella y Platja Gran

Sin embargo, el modelo MSP no es capaz de predecir la magnitud que alcanzan los coeficientes de amplificación resonantes, obteniéndose en la mayoría de las veces, valores erróneos que se corrigen utilizando un factor de fricción por fondo, siendo éste el único mecanismo disipador de energía que el modelo contempla, subestimando así los efectos de disipación de energía derivados de la radiación del flujo hacia la zona exterior del puerto.

Además, el modelo MSP al ser un modelo lineal, no permite identificar los procesos no lineales que las ondas presentan al propagarse bajo efectos resonantes dentro y fuera del puerto. Por ejemplo, la aparición de armónicos de orden superior dentro de las dársenas, la generación de complejos patrones de oscilación resultado de las combinaciones asimétricas entre nodos y antinodos en la dársena, además de la posible transferencia energética entre frecuencias por la interacción no lineal, elevando los valores de amplificación de los armónicos de orden superior durante el evento resonante y generando patrones de oscilación con un alto grado de complejidad dentro y fuera de las dársenas.

Adicionalmente, es necesario destacar que el modelo MSP, únicamente arroja resultados en una situación estacionaria, perdiendo así la importante información en la transitoriedad de los procesos involucrados en el fenómeno de resonancia portuaria, siendo incapaz de ser alimentado por series de ondas transitorias obtenidas directamente de modelaciones físicas en laboratorio, o bien de mediciones en campo.

Un segundo modelo numérico bidimensional basado en las ecuaciones de onda en aguas someras (*shallow water equations*) ha sido utilizado para el estudio de las oscilaciones resonantes de Ciutadella y Platja Gran, GIOC (2004). Se trata de un modelo denominando H2D que integra las ecuaciones de momentum y continuidad promediadas en vertical, y que resuelve numéricamente una onda no lineal que se propaga sobre batimetría real, bajo un esquema de diferencias finitas.

Dentro de este estudio se simuló una serie real de superficie libre de 40 horas medida en el exterior de las calas, tomada como elemento forzador del modelo H2D, obteniendo resultados representados en forma de coeficientes de amplificación conseguidos a través de la comparación directa entre espectros de energía calculados dentro y fuera de la zona portuaria, encontrando buenos resultados en contraste con aquellos obtenidos con las series reales medidas en campo.

Los resultados numéricos que un modelo tipo H2D ofrecen una adecuada caracterización del fenómeno de resonancia, a lo largo de la escala temporal, y logran simular las transformaciones del flujo sobre contornos y batimetrías reales. Sin embargo, los resultados no son lo suficientemente rigurosos en cuanto a las transformaciones dispersivas que sufren las ondas, debido a que las ecuaciones planteadas por el modelo H2D se ven limitadas en cuanto a los términos dispersivos se refiere, dejando a un lado las posibles interacciones que ocurren entre las altas frecuencias.

Finalmente, cabe mencionar que dentro del fenómeno de la resonancia portuaria existen factores de disipación que implican una alta complejidad para su modelación numérica, como por ejemplo, los diferentes efectos de fricción para contornos naturales y artificiales que se presentan en un puerto real, las zonas con alto decaimiento energético por efectos de turbulencia (zona de bocanas), e inclusive el posible rebase que sufren las estructuras y contornos durante episodios de agitación extraordinaria.

Estos efectos son un ejemplo de que en general las modelaciones numéricas presentan importantes limitaciones, y que aún existe un gran número de variables imponderables involucradas en los procesos de resonancia portuaria bajo condiciones reales.

8.4 DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

En este apartado se presenta el primer paso que se sigue para la realización de las simulaciones numéricas de agitación resonante para una configuración portuaria real, a través del modelo numérico MANOLO descrito en el capítulo 6.

Se elige este modelo numérico debido a que se basa en un sistema avanzado de ecuaciones que permite la obtención de las características de transformación de un flujo en un dominio bidimensional, considerando las características no lineales, dispersivas y disipativas del flujo en cada punto del dominio numérico y a lo largo del tiempo.

Se considera que el modelo numérico MANOLO es la herramienta numérica óptima para la realización de estudios que involucren el fenómeno de resonancia en configuraciones portuarias reales, superando a los modelos que hasta la fecha han sido utilizados para este fin, los cuales presentan importantes limitaciones, basándose en fuertes hipótesis simplificadoras.

Se propone la utilización del modelo MANOLO, descrito en el capítulo 6, a fin de promover una nueva herramienta numérica avanzada que debido a las ecuaciones que resuelve, se considera óptima para acometer un estudio complejo de resonancia portuaria real.

El modelo numérico MANOLO ha presentado un excelente comportamiento en cuanto a la modelación de los casos de resonancia no lineal y acoplada realizados en laboratorio.

A continuación, se presenta el trabajo de calibración y diseño de las simulaciones numéricas para el estudio de las oscilaciones resonantes del puerto de Ciutadella y Platja Gran.

El trabajo de calibración y diseño de las simulaciones presentado en este apartado, es análogo al presentado en el capítulo anterior del diseño de las simulaciones para los casos de laboratorio.

En primer lugar, se presenta la elección y tratamiento de las series de ondas medidas en campo que son utilizadas como elemento forzador de las simulaciones numéricas. Posteriormente, se presenta el diseño del dominio numérico, mencionando las características generales en cuanto a las características geométricas del contorno, batimetrías utilizadas, dimensiones y características de la zona de generación, construcción de la zona de radiación y absorción de las ondas que se mueven hacia el exterior del dominio, elección de los factores de disipación y planteamiento de los tiempos de simulación.

8.4.1 Series de oscilaciones seleccionadas

Contar con registros largos, continuos y simultáneos de ondas medidos en diferentes puntos interiores y exteriores de la zona de estudio, nos ofrece la libertad de buscar y seleccionar aquellos eventos específicos que representen estados de mar bien definidos.

La identificación de diferentes estados de mar dentro del registro total, permite diversificar la utilización del modelo numérico, no solo para los episodios excepcionales de resonancia portuaria, sino para registros que se manifiestan regularmente en las inmediaciones del Puerto de Ciutadella y Platja Gran.

Marcos *et al.* (2004), proponen la identificación de tres series continuas de ondas que representan tres comportamientos energéticos bien diferenciados: un evento de rissaga o de alta energía, un evento de energía intermedia, y un evento de baja energía, cada uno con una duración exacta de cuatro horas.

Considerar tres eventos de oscilación con diferentes energías, permite caracterizar el comportamiento que presenta el modelo para diferentes efectos no lineales de oscilación resonante, y comprobar que el modelo es capaz de simular un gran número de condiciones de oscilación de onda larga.

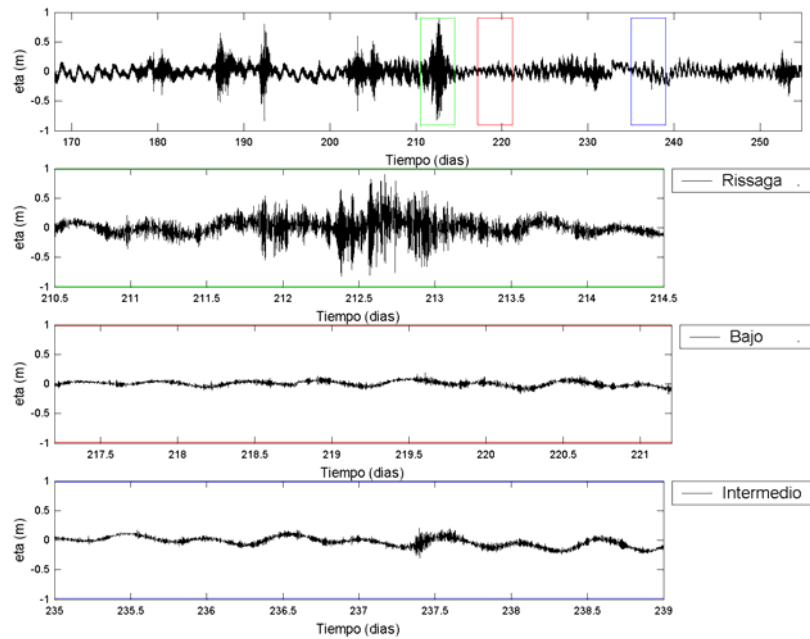


Figura 8.8 Eventos seleccionados para la realización de las simulaciones

La figura 8.8 muestra las tres diferentes ventanas que delimitan cada uno de los eventos seleccionados para la realización de las simulaciones numéricas sobre el registro del sensor M2.

La elección de cada uno de estos registros se hace siguiendo un criterio de verificación de las máximas amplificaciones alcanzadas dentro del puerto de Ciutadella (sensor M2), identificando así el primer registro de rissaga o evento de energía máxima, con fecha del 21 al 25 de julio de 1997 (véase figura 8.8), siendo éste el evento más energético de la serie total con una altura máxima de onda de 125 cm. El segundo registro con fecha del 16 al 20 de agosto de 1997 corresponde a un evento de energía intermedia con una altura máxima medida de 25 cm. Finalmente, se selecciona un registro de baja energía con 5 cm de altura máxima registrada entre el 27 al 31 de julio de 1997.

8.4.2 Tratamiento de las series a modelar

Como se pudo ver en el capítulo anterior, el modelo numérico MANOLO posee la capacidad de generar numéricamente diversas condiciones de ondas incidentes, contemplando ondas monocromáticas, ondas solitarias, ondas compuestas como suma lineal de armónicos con fases aleatorias, y oleaje espectral multidireccional a partir de parámetros espectrales tipo TMA o JONSWAP.

Los estudios que simulan condiciones reales de oleaje utilizando algún modelo de Boussinesq, Nwogu & Demirbilek (2001), Shi *et al.* (2003), tradicionalmente utilizan como condición inicial espectros direccionales tipo TMA, que guardan equivalencia con el espectro real medido, obteniendo generalmente buenos resultados.

El poder simplificar un registro de ondas irregulares y adaptarlas a un espectro teórico equivalente es una tarea que resume, en gran parte, las dificultades que presenta la implementación matemática de las oscilaciones irregulares dentro de los modelos de Boussinesq, lo cual permite conocer, de forma general, las variaciones energéticas que sufren las ondas al transformarse dentro del dominio numérico.

Sin embargo, el uso de un espectro teórico equivalente no contempla aquellos registros que reparten la energía total en múltiples frecuencias, o se obtienen de registros de ondas en la rama de bajas frecuencias, haciendo que la adaptación de la serie de ondas irregulares a un espectro teórico (JONSWAP o TMA), no sea una técnica recomendable para estudios que utilicen este tipo de registros.

Por esto y para que las simulaciones reproduzcan adecuadamente los procesos del oleaje a lo largo del tiempo, se requiere una generación de ondas numéricas exactamente igual al medido en campo, ola a ola. Esto implica que las series deben de pasar por un tratamiento matemático que las adapte al algoritmo de generación que el modelo impone.

Para la generación numérica de una serie irregular de ondas medidas, se aplica la metodología propuesta por Wei *et al.* (1999) con ciertas modificaciones matemáticas propuestas en esta Tesis.

El modelo genera el oleaje a partir de una función fuente rectangular situada en el interior del dominio numérico, que añade o quita masa dentro del dominio en función de la altura de ola, la profundidad y el periodo y la dirección de la onda a simular. Dicha masa se suma directamente a la ecuación de continuidad en cada paso de tiempo con una función sinusoidal.

Originalmente la ecuación de masa se diseñó para una onda monocromática direccional fijando los parámetros de amplitud, dirección y periodo constantes. Posteriormente se adaptó dicha función para valores de espectros direccionales teóricos, realizando una sumatoria del total de componentes frecuenciales y direccionales, pero conservando aún una amplitud de onda constante.

En este trabajo de Tesis se ha logrado adaptar la ecuación original propuesta por Wei *et al.* (1999), para la generación de ondas irregulares, con la capacidad de variar la amplitud de onda para cada componente frecuencial y direccional, quedando como sigue.

$$F(t) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{2\eta_i (\omega^2 - \alpha_1 g k_i^4 h^3)}{\omega_i I_1 [1 - \alpha(k_i h)^2]} \sin(\omega_i t + b_i) \right) \quad (8.1)$$

donde el subíndice i representa cada componente espectral obtenida de la transformada rápida de Fourier aplicada a la serie real; η_i representa la amplitud; ω_i la frecuencia angular; k_i el número de onda; b_i la fase; h es la profundidad en la fuente y g la aceleración de la gravedad. El factor I_1 , corresponde al factor de forma, α , y α_1 al tipo de aproximación de las ecuaciones de Boussinesq a utilizar, Nwogu (1993).

Para cada paso de tiempo de modelación, se obtiene el sumatorio de la ecuación de masa para todas y cada una de las componentes espectrales, y se multiplica por una función sinusoidal que lee la fase real obtenida directamente del espectro FFT, para cada paso temporal de simulación.

Para los casos considerados, se eligen las series de superficie libre medidas en el sensor MW1 como valores de entrada para las simulaciones, considerando que dichas series corresponden al sistema de ondas más alejado de la influencia de las calas de Ciutadella y Platja Gran, y más cercanas al forzamiento natural exterior.

Antes de obtener los parámetros espectrales de las series reales que servirán como condición inicial de incidencia para las simulaciones, se debe de realizar un filtrado de la marea registrada en los sensores, debido a que el esquema numérico de generación de ondas que el modelo plantea, no contempla una variación de nivel medio dentro del dominio computacional a lo largo del tiempo (efecto de marea).

El resultado del filtrado de marea se muestra en la figura 8.9 para los registros de los sensores MW1 y M2 para la serie de rissaga.

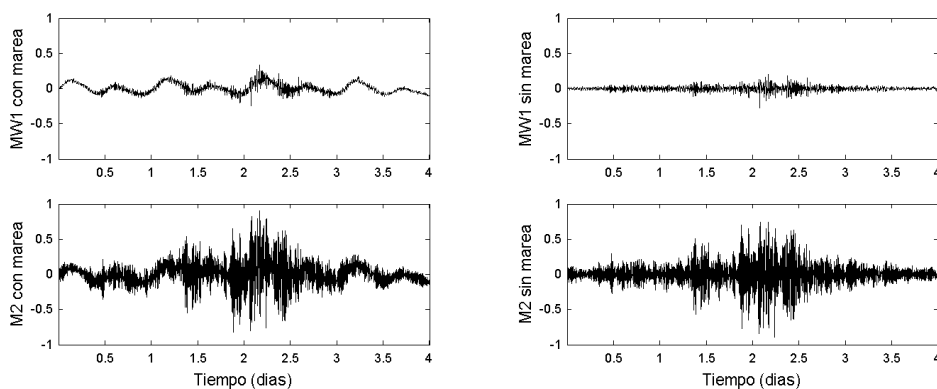


Figura 8.9 Series medidas en MW1 y M2 para el registro de rissaga, a) Serie intacta, b) serie con marea filtrada.

El filtrado de marea se realiza con una técnica paso-banda (*band-pass filter*), que separa las frecuencias que quedan fuera de los límites definidos por una ventana senoidal. En este caso la frecuencia mínima de filtrado es $f_{min}=4.1666 \times 10^{-5}$ Hz que corresponde a una marea semidiurna de aproximadamente 6 h.

La realización de un filtrado de la marea del registro que alimentará al modelo numérico, implica que durante las simulaciones las transformaciones que sufren los trenes de ondas por efectos de asomeramiento, debidas las variaciones temporales del medio del mar, no serán reproducidas fielmente y que se presentarán sobre-estimaciones y sub-estimaciones cíclicas durante toda la simulación.

Adicionalmente, el filtrado de la marea de las series de ondas incidentes, hace que las olas de mayor amplitud no se disipen con la intensidad real a lo largo del tiempo de simulación, debido a que se mantienen constantes los valores de disipación por fricción en el fondo.

Para este estudio en particular, se consideran despreciables las posibles variaciones en los resultados obtenidos numéricamente, por efecto del filtrado de la marea de las series incidentes, debido a que para esta zona de estudio, la marea en la zona Mediterránea Balear es de características micromareales, con oscilaciones alrededor de 10 cm que no presentan una influencia determinante para aquellas propagaciones numéricas que presentan sobre-amplificaciones resonantes importantes, como las simuladas en este capítulo.

Lo anterior se pudo comprobar en GIOC (2004), en el trabajo de calibración de las simulaciones con el modelo H2D para condiciones sin marea, comparadas con los casos con marea, en donde las comparaciones de la respuesta de amplificación para ambos casos no presentan diferencias importantes.

Para la obtención de las amplitudes, frecuencias y fases espectrales se aplica una transformada rápida de Fourier o FFT a cada uno de los tres registros del sensor MW1 para las simulaciones seleccionadas.

Tras la aplicación de la transformada FFT, se obtiene un total de 2880 componentes armónicas de amplitudes, frecuencias y fases. La figura 8.9 muestra la recomposición analítica de la serie real medida en el sensor MW1 del caso de rissaga para las primeras 12 horas.

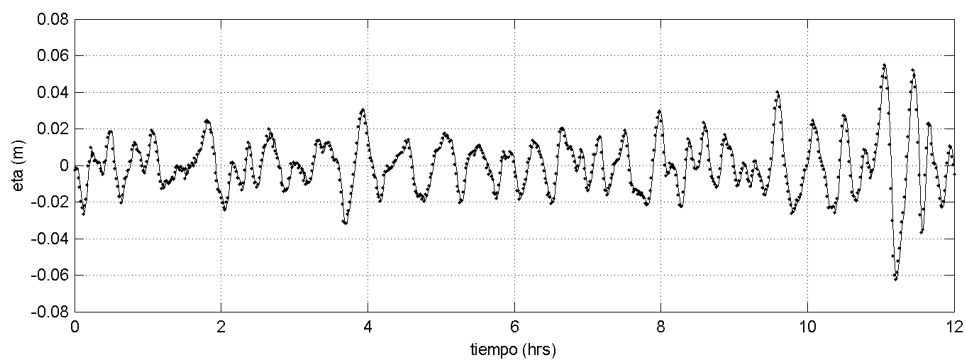


Figura 8.9 *Recomposición analítica de la serie medida MW1, caso rissaga.*

8.4.3 Definición del dominio numérico

El diseño del dominio numérico consiste en trasladar las condiciones y características de los contornos, y de generación de las oscilaciones que existen en el prototipo, hacia un sistema sintetizado de la realidad que permite reproducir adecuadamente los procesos asociados a la transformación de las ondas, generalmente contemplando fuertes hipótesis simplificadoras.

En este apartado, se presentará el diseño del dominio numérico a través de una malla no estructurada en elementos finitos triangulares, generada sobre una batimetría real. Posteriormente se realiza una descripción de las características del área de generación que será utilizada en las simulaciones numéricas, definiendo su ubicación, geometría y dimensiones, y finalmente se discuten las dimensiones y características propias que se asignan a la zona de absorción de las ondas que se mueven hacia el exterior del dominio.

El primer paso dentro del diseño del dominio numérico, es definir un contorno que adopte las formas geométricas de la zona de estudio, y que a su vez contenga los elementos finitos triangulares de la malla de cálculo.

Se delimita el contorno del dominio numérico que será utilizado en las simulaciones, siguiendo el contorno real de las calas de Ciutadella y Platja Gran, extendiendo el límite sur del dominio hasta aproximadamente 4000 m al sur de la bocana de Platja Gran, y cerca de 3500 m al oeste de la bocana de Ciutadella, siguiendo la línea cero del contorno batimétrico. Adicionalmente se incluye el contorno correspondiente a la isla de Illot de sa Galera localizada en la bocana de la cala de Platja Gran con una forma cuasi-circular con un diámetro de 25 m aproximadamente.

Las dimensiones de los contornos se determinan teniendo en cuenta que el dominio computacional debe incluir una zona lo suficientemente amplia para posicionar el área de generación de ondas incidentes, que además de sus dimensiones propias, debe de estar colocada a una distancia mínima de la zona de estudio para asegurar la adecuada reproducción de las oscilaciones generadas en los puntos de análisis.

De igual manera, las dimensiones del área de generación se asignan en función de las dimensiones generales del dominio computacional propuesto, y en función de las características físicas de las ondas a simular, haciendo que el diseño del dominio computacional y la asignación del área de generación conlleven un proceso iterativo que se retro-alimenta hasta alcanzar valores geométricos óptimos y equilibrados para ambos elementos espaciales.

La generación de oscilaciones irregulares se realiza situando un área rectangular dentro del dominio, la cual añade o quita masa en el dominio utilizando un volumen Gaussiano de altura variable situado sobre el área de generación rectangular, permitiendo realizar las variaciones cíclicas de la superficie libre.

El análisis de las series de ondas que alimentan los casos a simular, permite asignar las dimensiones de anchura de la base del área de generación para cada caso, en función de una longitud de onda representativa de todo el registro, Wei *et al.* (1999), relacionando la anchura del área de generación con dicha longitud de onda como sigue.

$$W = \delta \left(\frac{L}{2} \right) \quad (8.2)$$

donde W define el ancho de la zona de generación, δ tiene valores que oscilan entre 0.3 y 0.5 Wei *et al.* (1999), y L es la longitud de onda representativa de las ondas a simular.

En el caso de una onda monocromática, la longitud representativa de la onda es única y, por lo tanto, la elección del ancho del área de generación es directa, mientras que para ondas irregulares, los autores recomiendan la elección de una longitud representativa de la serie completa de ondas individuales, tomando el valor del periodo de pico del espectro de energía de la serie completa y obteniendo así dicha longitud de onda.

Esta técnica permite visualizar rápidamente el valor de la longitud representativa de ondas irregulares para todo el registro. Sin embargo, está diseñada para registros cuyos espectros de energía cuentan con frecuencias de pico bien definidas y en la banda de onda corta.

En nuestro caso particular si obtenemos los espectros de energía para las series correspondientes al sensor MW1 para los tres casos seleccionados, como se muestra en la figura 8.10, se puede observar que la energía se reparte en múltiples picos con magnitudes energéticas similares entre si, dentro de la banda de onda larga, por lo que la identificación directa de una frecuencia única que sirva para definir un área de generación, no será adecuada a la física del problema. Además, si aplicamos directamente la ecuación (8.2) se tendrían valores extremadamente grandes para el ancho de la zona de generación.

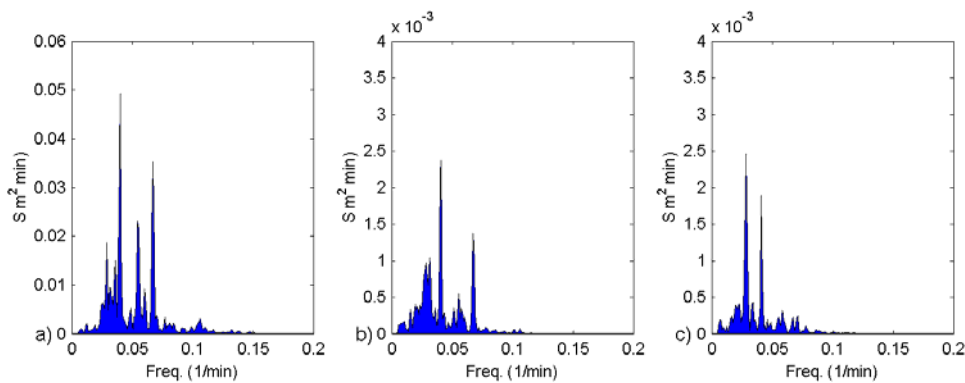


Figura 8.10 Espectros de energía del sensor MW4 para los registros correspondientes a los casos, a)energía alta (rissaga), b) Energía intermedia, y c) Energía baja. La escalas verticales son relativas a los máximos de cada espectro.

Por ello, es necesario proponer nuevos valores de δ tales que delimiten los anchos de la zona de generación para cuando se tienen registros de ondas irregulares con múltiples picos como los observados en la figura 8.10.

Para asegurar que el área de generación sea lo suficientemente amplia para representar todas las frecuencias del sistema de ondas incidente, se decide que la frecuencia representativa de las series seleccionadas, corresponda a la frecuencia más energética dentro de los tres registros $f=0.04 \text{ min}^{-1}$, equivalente a una onda de $L=27394\text{m}$ en el sensor MW1 con profundidad igual a $h=36.6\text{m}$.

Como se mencionó anteriormente, el considerar los límites convencionales del factor de forma δ para ondas largas, a la hora de aplicar la ecuación (8.2), implicaría el diseño de áreas de generación con dimensiones extremadamente grandes y, por ende, dominios computacionales que excederían las capacidades numéricas de los ordenadores empleados.

Basándonos en la experiencia adquirida en el manejo y diseño de simulaciones numéricas con el modelo MANOLO, se ha determinado que para la onda larga en general ($f < 1 \text{ min}^{-1}$), los límites del factor de forma δ quedarían comprendidos entre 0.03 y 0.05, obteniéndose simulaciones adecuadas para el sistema de ondas incidente de onda larga. Por lo tanto, si aplicamos los valores del nuevo factor de forma, se tiene que el ancho de la zona de generación a ser utilizado en las simulaciones es de $W=410 \text{ m}$.

Por otro lado, el ancho de la zona de generación corresponde a $Lg=2700 \text{ m}$, asignado en función de las dimensiones del dominio computacional, con la consideración particular de que dicho ancho debe de representar el frente de ondas incidentes a generar, capaz de abarcar la totalidad de la zona de estudio. La figura 8.11 describe la forma y dimensiones de la zona de generación diseñada.

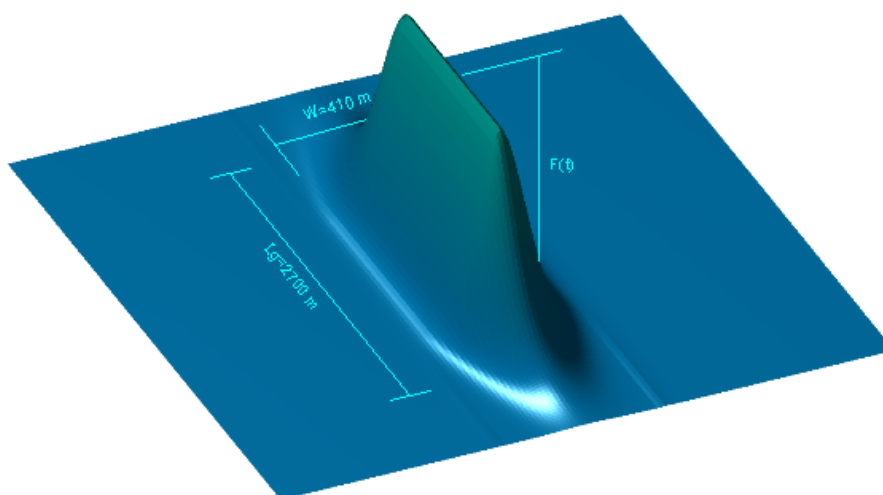


Figura 8.11 Representación del volumen Gaussiano utilizado como fuente de generación del oleaje dentro del dominio computacional

La orientación del área de generación, se determina teniendo en cuenta la dirección predominante del estado de mar incidente, y la posición se elige tomando una distancia mínima de generación de las ondas incidentes con respecto a la zona de estudio.

La onda incidente para los tres casos seleccionados se puede considerar cuasi-unidireccional, ya que las ondas largas que se aproximan a la zona de las calas de Ciutadella y Platja Gran, lo hacen con una dirección de aproximadamente 50° SW a causa de un efecto de los contornos circundantes que confinan las ondas largas que inciden en la zona.

El centro del área de generación se coloca en las coordenadas UTM $X=567818$ m, $Y=4424964$ m, punto situado en el límite exterior del dominio computacional, a 4500 m de las bocanas y a 1100 m de la línea que separa el dominio con la esponja de absorción de las ondas hacia el exterior.

Finalmente, para el diseño de la esponja de absorción, se aplica directamente el criterio propuesto por Kirby *et al.* (1998), considerando una longitud de corona igual a un tercio de la onda incidente representativa igual a 9500 m, obteniéndose una perfecta absorción de sistema de ondas para las tres simulaciones numéricas.

Las dimensiones, elementos y geometría del contorno a ser utilizado en las simulaciones numéricas del puerto de Ciutadella y Platja Gran se puede observar en la figura 8.12.

Ya habiéndose definido el dominio numérico y sus componentes geométricas de generación y absorción, se realiza un mallado en elementos finitos triangulares a través de una técnica de descomposición en polígonos de Voronoi y triangulación de Delaunay.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el mallado se diseña en función de las características físicas de las ondas a generar, asegurando que el tamaño de los elementos triangulares definan correctamente la longitud de onda en cada punto del dominio, con la ventaja de concentrar nodos y elementos triangulares en aquellos sectores con geometrías complejas o batimetrías con gradientes importantes.

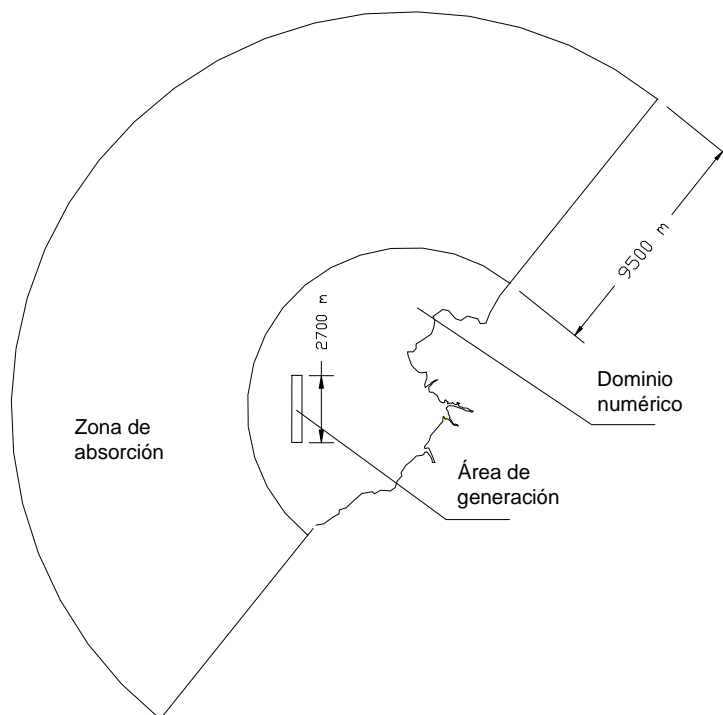


Figura 8.12 Esquema del dominio numérico, esponja absorbente y área de generación para las simulaciones del puerto de Ciutadella y Platja Gran

Se optó por diseñar una malla que tuviera al menos 15 nodos por longitud de onda en el dominio computacional y que respetara los puntos batimétricos reales obtenidos con la campaña LAST-97 para un periodo representativo de $T=90$ s, para así asegurar la óptima definición de todos los periodos superiores a este valor, además de obligar a la malla a que adopte al menos 3 elementos en las zonas más estrechas en las calas.

Para el mallado en la esponja absorbente, se fijó el tamaño del elemento triangular en 5 nodos por longitud de onda sobre un fondo constante de $h=36$ m que corresponde a la profundidad en la zona de generación de las ondas incidentes.

El proceso iterativo de generación geométrica de la malla que subdivide los triángulos y contornos del dominio, arrojó un total de 17327 nodos y 33516 elementos para el área total (dominio + esponja), sobre la batimetría real, tal como se observa en la figura 8.12a para el dominio general y 8.12b para las zonas de detalle del puerto de Ciutadella y Platja Gran.

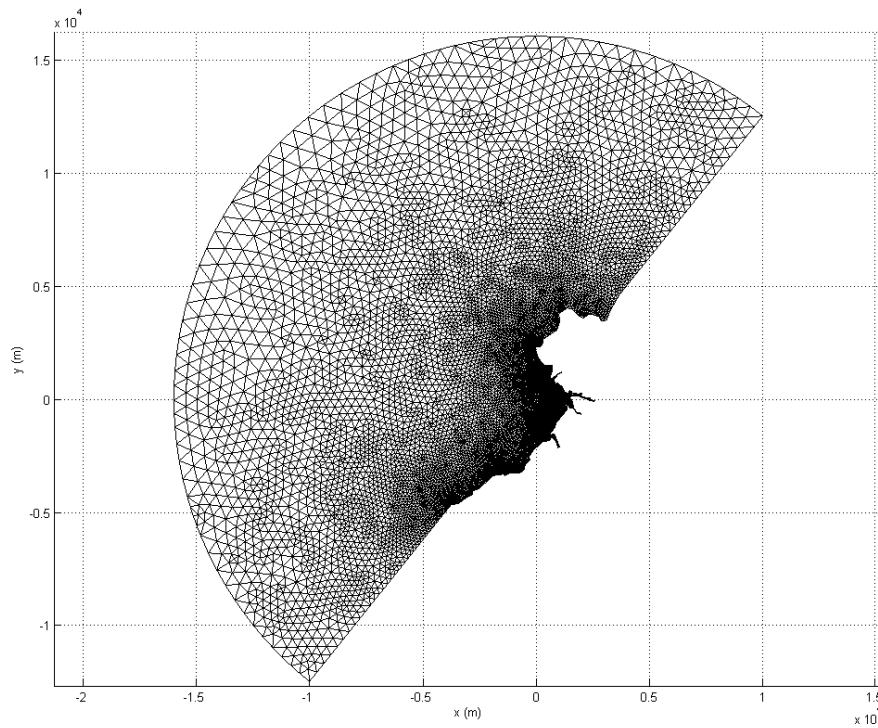


Figura 8.12a Dominio computacional y malla de elementos finitos Utilizado en las simulaciones numéricas.

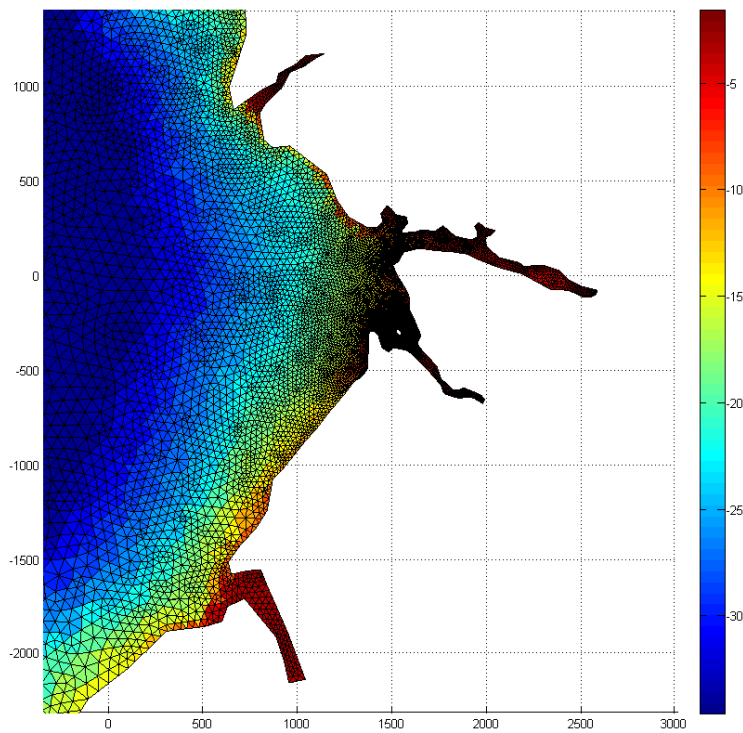


Figura 8.12b Detalle del dominio computacional y malla en elementos finitos con cotas batimétricas para el puerto de Ciutadella y Platja Gran.

Para las simulaciones con ondas irregulares para esta banda de frecuencias no hay rotura sobre la batimetría real. El factor de fricción en el fondo se consideró como único mecanismo de disipación de energía de las ondas.

La disipación por efectos de rotura no fue considerada para la realización de las modelaciones numéricas, debido a que se utilizan series de ondas largas con una altura de onda relativa de $H/h < 0.4$, para el caso más energético de altura de onda sobre el fondo más somero. De igual forma no se consideraron los efectos por mezcla turbulenta por no contar con los efectos turbulentos inducidas por rotura, y por conservar un mismo orden de magnitud entre los elementos de menor longitud con la profundidad representativa del dominio.

El valor del factor de fricción que fue asignado para las simulaciones se obtuvo directamente de recomendaciones para simulaciones anteriores GIOC (2004), tomando como valor de fricción base el correspondiente a un tamaño de grano $D_{90}=17$ mm, que corresponde a un coeficiente de Chezy $Ce=20$ y es equivalente a un factor de fricción por fondo $f_w=0.05$, asignado para las tres simulaciones numéricas.

8.5 RESULTADOS Y COMPARACIONES NUMÉRICAS

En esta sección, se muestran los resultados de superficie libre obtenidos a partir de las simulaciones numéricas para los tres casos reales de forzamiento seleccionadas, comparados con los datos de superficie libre medidos en campo durante la campaña LAST-97.

Adicionalmente, se presentan resultados de espectros de energía comparados para los siete puntos de control dentro del dominio; los factores de amplificación obtenidos dentro de las dársenas comparados con los factores de amplificación reales, y un análisis de los efectos de transferencia energética en el tiempo para cada una de las series a través de la utilización de la técnica espectral Wavelet.

8.5.1 Series temporales de superficie libre

Para ilustrar las capacidades del modelo en la generación del sistema de ondas largas incidentes, en la figura 8.13 y 8.14 se muestran las comparaciones directas de la superficie libre obtenida con el modelo numérico para los sensores ubicados en la zona exterior y zona interior de las calas, respectivamente con los valores medidos en campo para el tiempo inicial $t_i=200$ min hasta el tiempo final $t_f=1200$ min. Ambas corresponden al caso del forzamiento más energético o caso rissaga.

En los sensores que se encuentran localizados en el exterior de las calas (sensores MW's), se observa una buena reproducción de las características de la superficie libre a lo largo del tiempo, con excepción del sensor MW2 que presentó problemas durante la campaña de campo LAST-97. Esto demuestra que tanto la definición del dominio numérico y la zona de generación, como la descomposición de la serie real en armónicos y fases ha sido realizada correctamente.

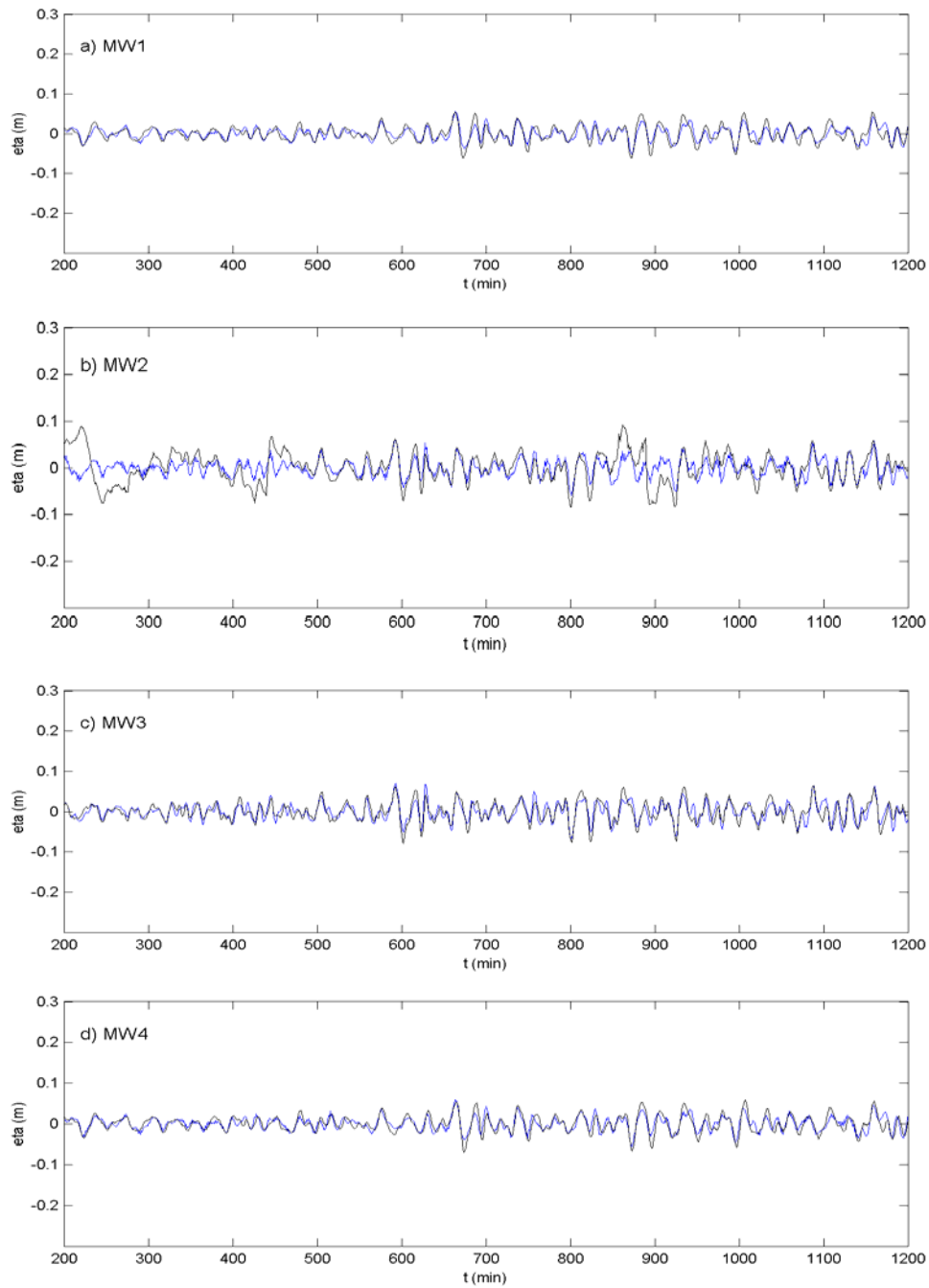


Figura 8.13 Series temporales de ondas irregulares modelado (azul) y medido (negro) para el caso rissaga, en los sensores situados en la zona al exterior de las calas.

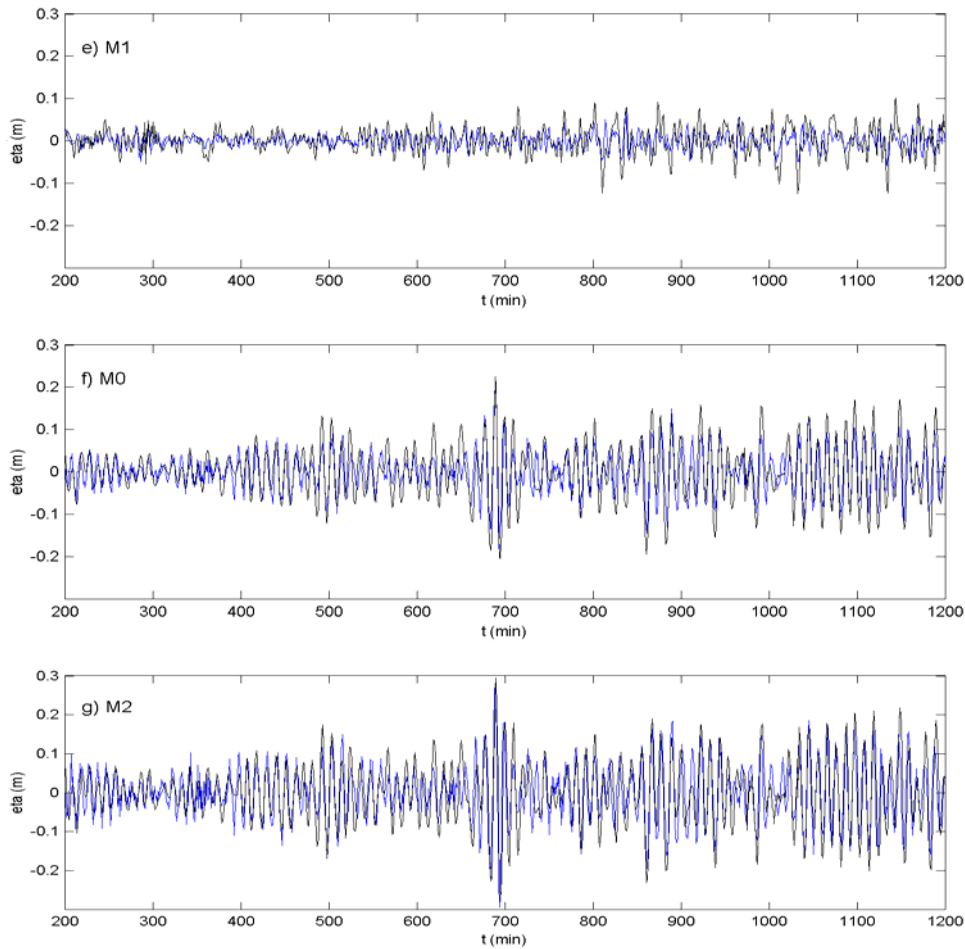


Figura 8.14 Series temporales de ondas irregulares modelado (azul) y medido (negro) para el caso rissaga, en los sensores situados en el interior de las calas de Ciutadella y Platja Gran.

Las fases del sistema de ondas largas simuladas en la zona exterior se reproducen adecuadamente y conservan una buena correlación con los datos reales a lo largo del tiempo. Por otro lado, se aprecian diferencias en las amplitudes de las olas individuales en el forzamiento incidente, debido a que las ondas incidentes generadas de forma numérica contienen los efectos combinados de incidencia, refracción, reflexión, y radiación hacia el exterior, partiendo de una condición de calma, mientras que las características de ondas medidas en campo son resultado de un proceso de oscilación establecido a lo largo del tiempo.

Para los sensores localizados en el interior de las calas, figura 8.14, la superficie libre simulada con el modelo numérico adopta las amplificaciones por efectos de asomeramiento por fondo, conserva las fases y reproduce adecuadamente los grupos más energéticos de ondas, especialmente para los puntos situados dentro de la cala de Ciutadella (sensores M0 y M2).

El sensor ubicado en la cala de Platja Gran (sensor M1), presenta una peor correlación con los datos medidos en campo y aunque conserva las fases adecuadamente, se observa que algunas olas individuales simuladas, subestiman las amplificaciones alcanzadas en dicho punto, posiblemente debido a que las características batimétricas de esta zona requieran un mayor número de elementos numéricos para su adecuada representación, ya que incluye los calados más someros y la descomposición frecuencial de energía tiende hacia frecuencias más altas.

A continuación, se muestran los registros completos de superficie libre para los cuatro días de duración para el caso más energético (rissaga).

Las figuras 8.15 y 8.16 muestran las series comparativas de superficie libre para el caso de mayor energía (caso rissaga), para la zona exterior e interior de las calas respectivamente. Las escalas verticales se modifican para los sensores ubicados dentro de las calas para su mejor apreciación.

Se muestran los resultados para los siete puntos, incluyendo el correspondiente al sensor MW2, el cual no logro medir adecuadamente el registro temporal de superficie libre durante la campaña de campo LAST-97.

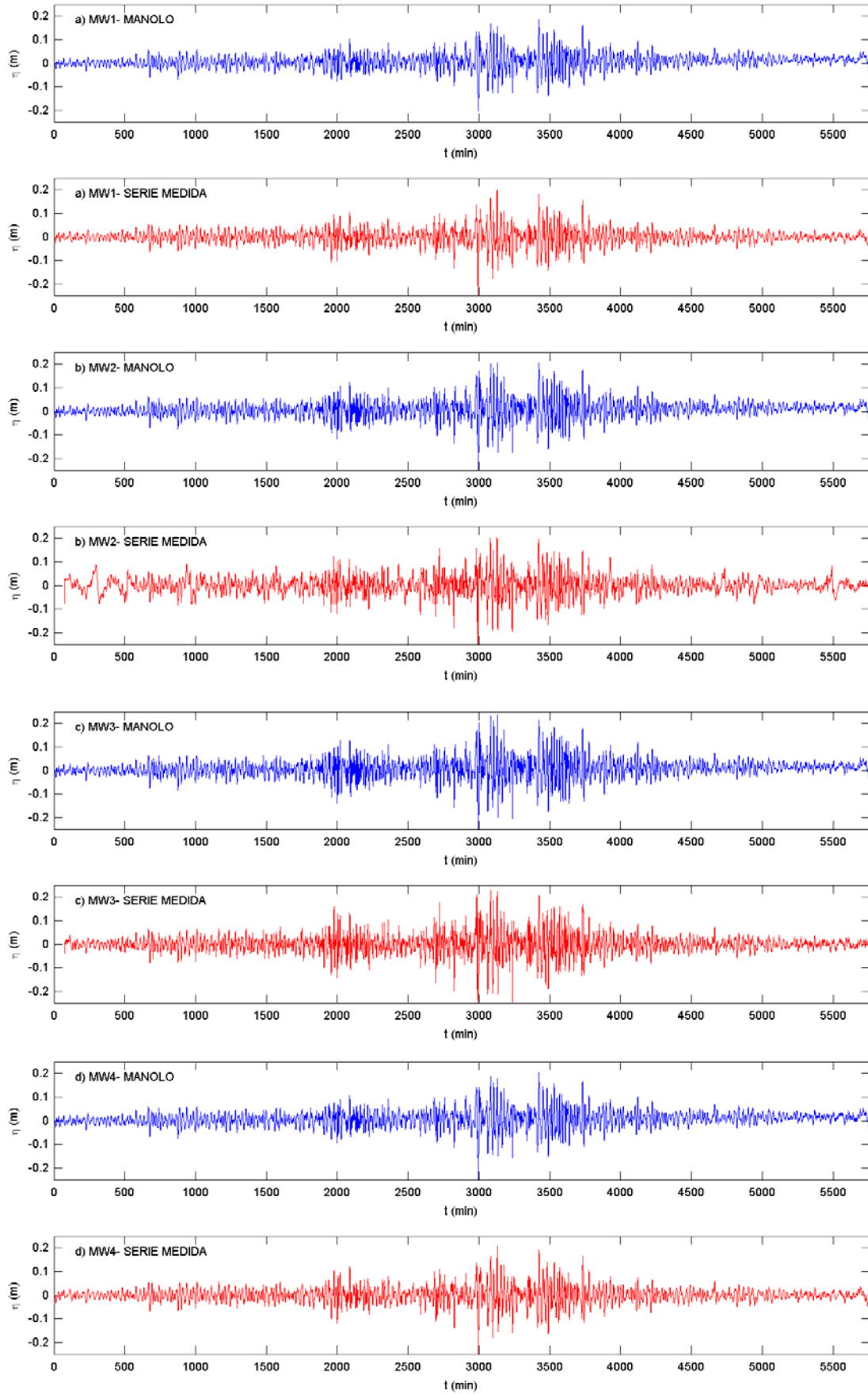


Figura 8.15 Registros temporales de superficie libre para el caso rissaga (sensores MW1, MW2, MW3 y MW4). Datos medidos (rojo), resultados numéricos (azul).

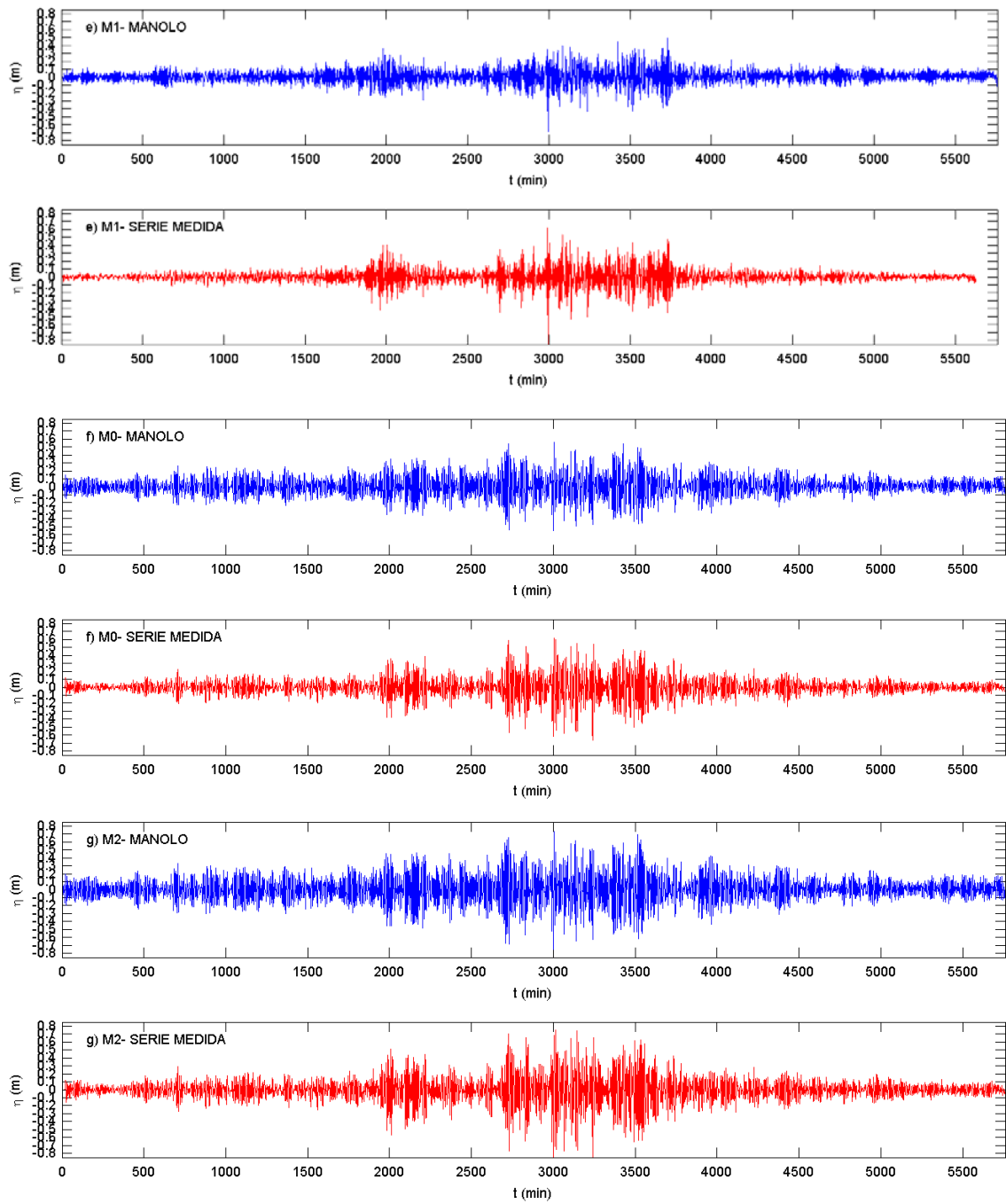


Figura 8.16 Registros temporales de superficie libre para el caso de energía rissaga (sensores M1, M0 y M2). Datos medidos (rojo), resultados numéricos (azul).

Los registros temporales de superficie libre obtenidos con el modelo numérico para el caso rissaga, figura 8.15 y 8.16, muestran, en general, una buena correlación con las series de datos medidos en campo, particularmente para el episodio de resonancia de corta duración registrado (de $t_i=1900$ min a $t_f=2200$ min), y para el episodio más energético ($t_i=2700$ min a $t_f=3700$ min), mostrando las capacidades numéricas que el modelo tiene para evaluar diversos episodios energéticos lo largo del tiempo. Los patrones de oscilación y los efectos de sobre-amplificación de las ondas generadas por resonancia son muy semejantes en el modelo y en el campo.

Las comparaciones temporales de superficie libre representadas en las figuras anteriores, permiten visualizar, de forma general, la calidad del trabajo de modelación numérica realizado por el modelo MANOLO para los casos seleccionados, que además de arrojar información sobre las magnitudes escalares de amplificación y dispersividad de las ondas registradas en cada sensor, permite la observación directa del desarrollo temporal de dicha transformación no solo en los puntos mencionados, si no además en cualquier punto dentro del dominio, e inclusive en mapas integrados de superficie libre para todo el dominio y para cada paso de tiempo.

Sin embargo, la observación de la comparación de los no es suficiente para observar el funcionamiento del modelo en cuanto a los valores energéticos de las ondas y sus transformaciones frecuenciales a lo largo del tiempo. Por esto, a continuación se presenta un análisis de las cantidades energéticas registradas en cada punto de medición, comparadas con las medidas de campo a partir de la aplicación de una técnica de obtención de los espectros de energía a través de una transformada discreta de Fourier.

8.5.2 Espectros de energía

En este apartado se presentan las comparaciones entre los casos medidos en campo y los casos simulados numéricamente utilizando una representación en espectros de energía, para cada uno de los tres casos simulados.

Para cada registro de superficie libre, se obtiene la densidad espectral con una función tipo psd (*power spectral density*), aplicada a cada señal temporal discreta, utilizando el método modificado de promedios de Welch para una ventana tipo Hanning de 512 puntos.

Las figuras 8.17, a 8.19 corresponden a los registros de energía máxima (rissaga), energía intermedia y energía baja respectivamente, e ilustran los cambios que la energía espectral sufre conforme cambian la localización de los puntos de control desde el exterior hasta el interior de las calas.

Las líneas continuas representan los valores medidos en la campaña LAST-97, mientras que las líneas y punto se asignan para los espectros generados con los valores numéricos. Para una mejor representación de los resultados, las escalas verticales de las figuras que representan a los sensores M1, M0 y M2 han sido ampliadas.

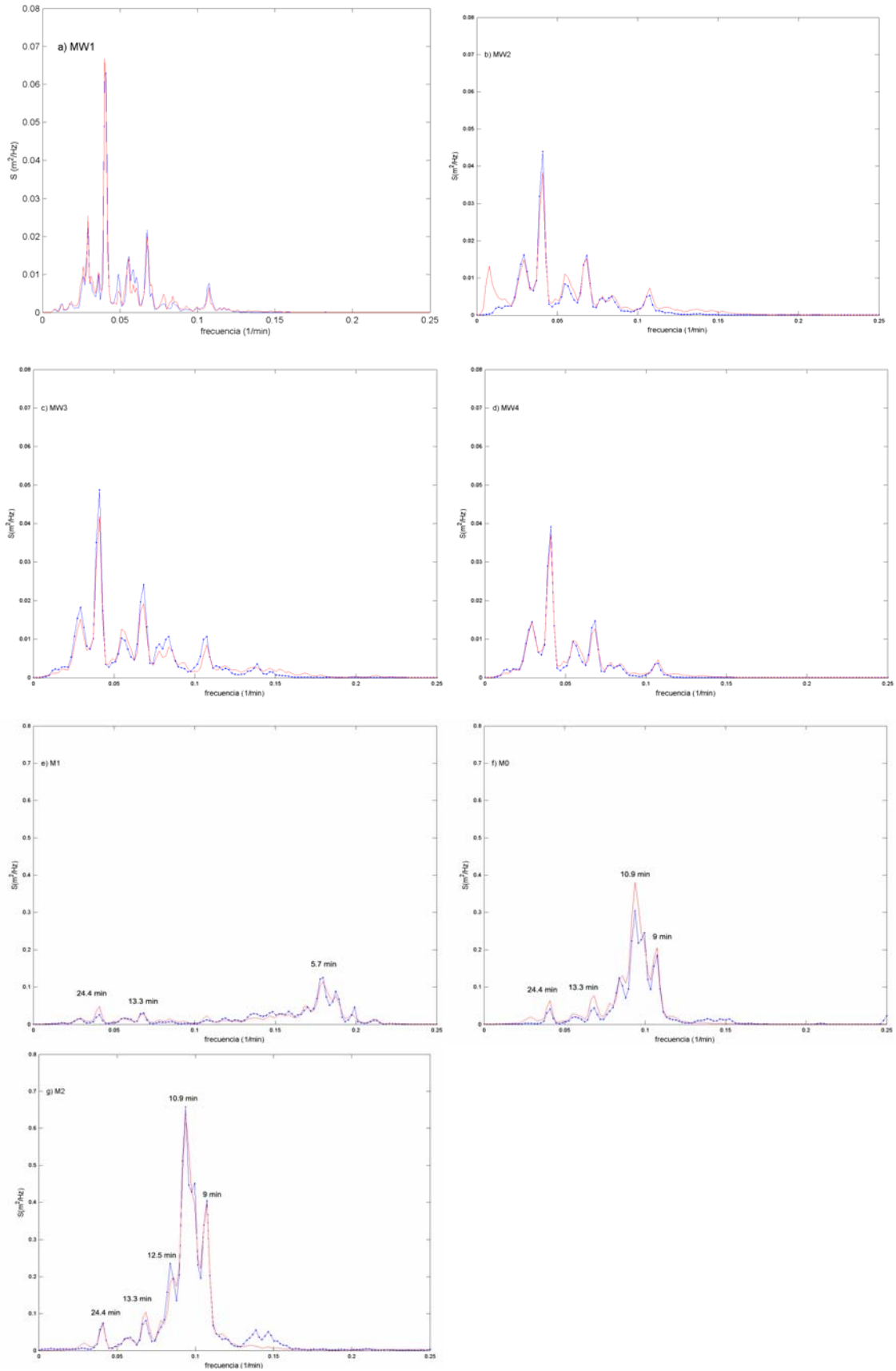


Figura 8.17 Comparación de los espectros de energía. Caso Rissaga. Sensores: a) MW1, b) MW2, c) MW3, d) MW4, e) M1, f) M0, g) M2, medido (línea roja), modelado (línea y punto azul)

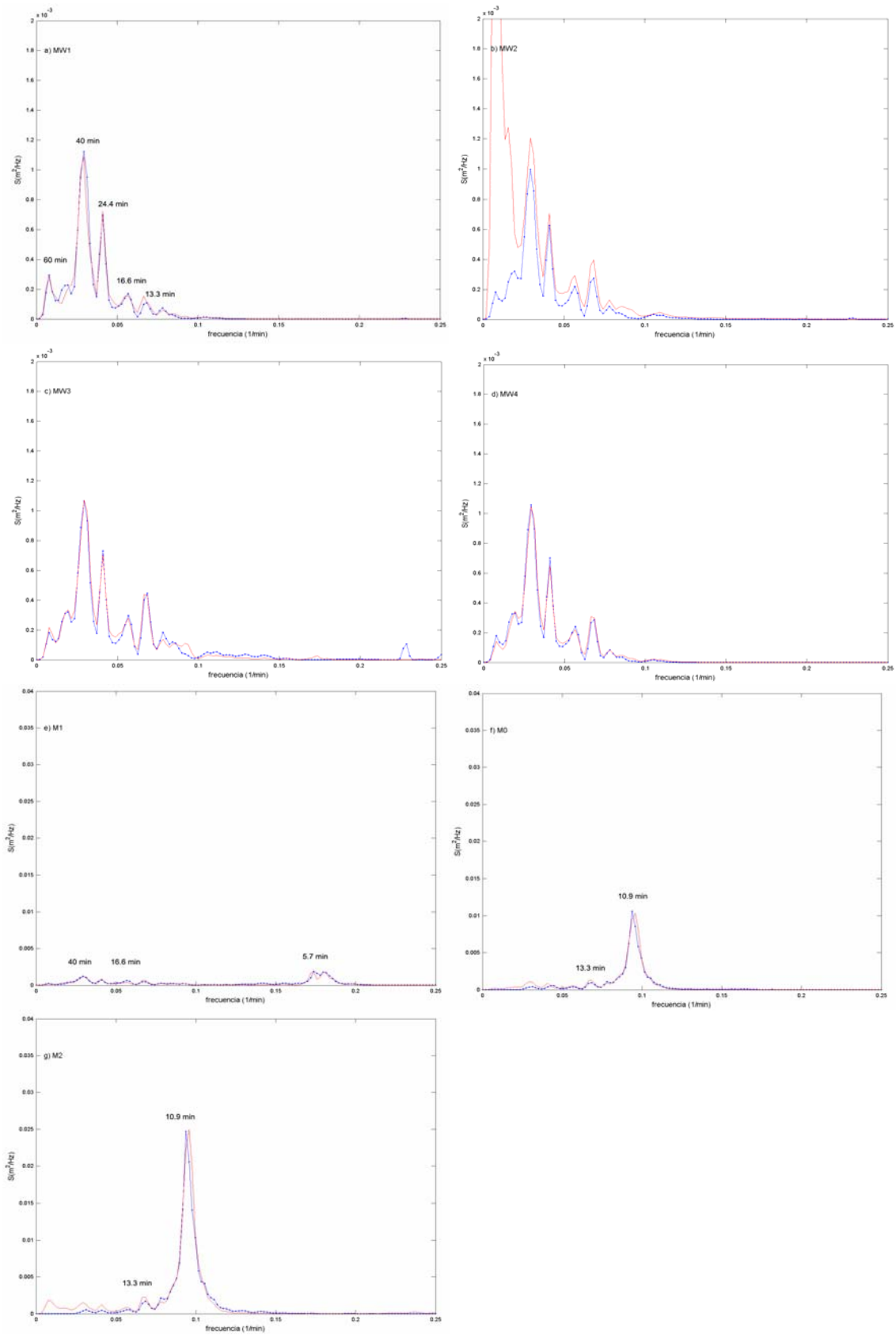


Figura 8.18 Comparación de los espectros de energía. Caso de energía intermedia. Sensores: a) MW1, b) MW2, c) MW3, d) MW4, e) M1, f) M0, g) M2, medido (línea roja), modelado (línea y punto azul)

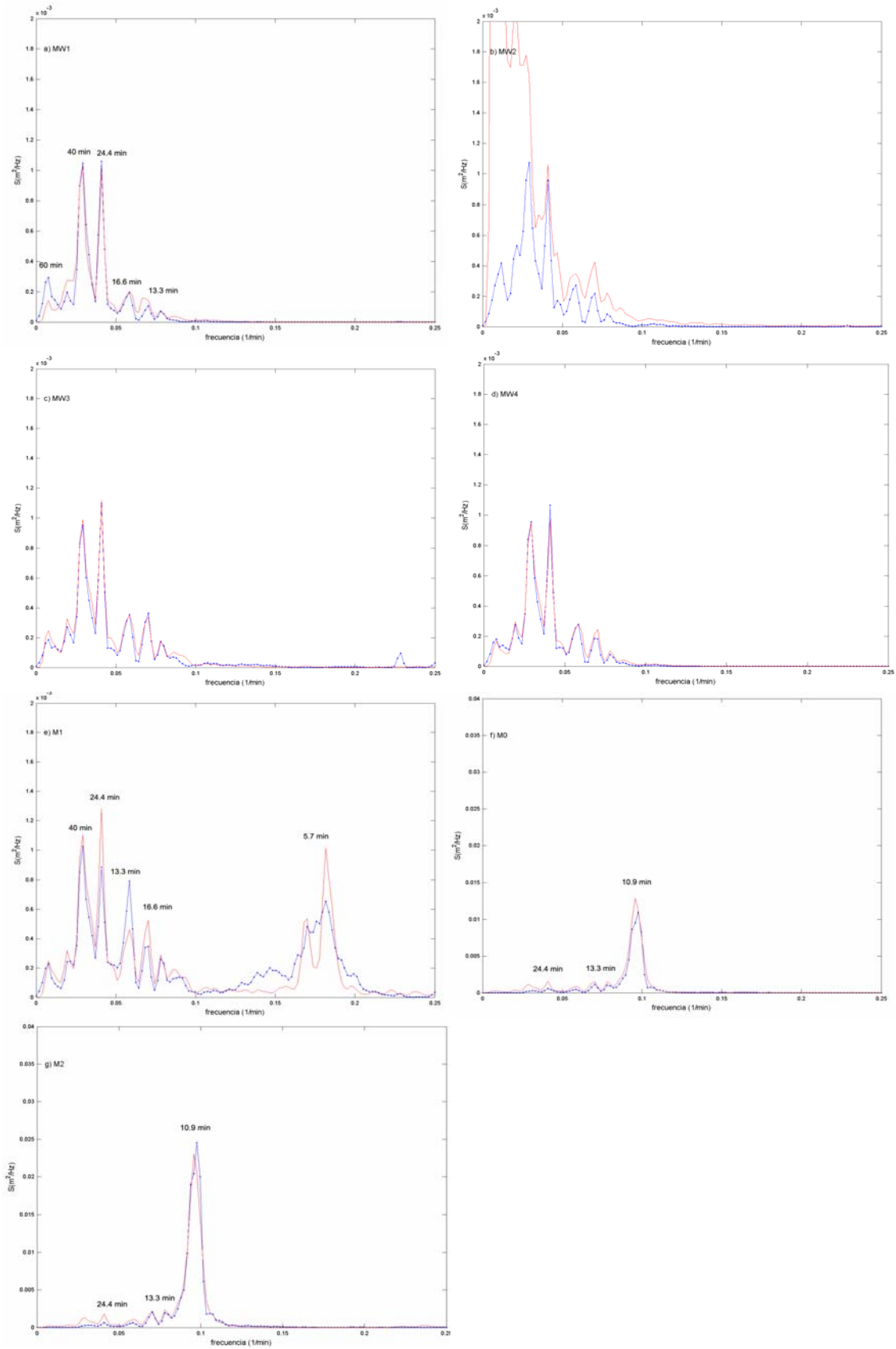


Figura 8.19 Comparación de los espectros de energía. Caso de energía baja. Sensores: a) MW1, b) MW2, c) MW3, d) MW4, e) M1, f) M0, g) M2, medido (línea roja), modelado (línea y punto azul)

Las tres figuras anteriores, demuestran que el modelo numérico es capaz de representar adecuadamente la propagación y su transformación energética en todos los puntos exteriores e interiores del dominio computacional. Los efectos resonantes y las transferencias de energía hacia frecuencias más altas para los puntos localizados dentro de las Calas de Ciutadella y Platja Gran, son bien representados por el modelo numérico.

Los sensores situados en el interior de las calas presentan una clara transferencia de energía hacia bandas de frecuencias más altas debida a las oscilaciones resonantes, presentando transformaciones energéticas importantes (asomeramiento, difracción, fricción por fondo, y efectos de amplificación). Este efecto es visible especialmente, para la banda de frecuencias $0.08 < f < 0.11 \text{ min}^{-1}$ dentro de la Cala de Ciutadella, así como para la banda $0.15 < f < 0.2 \text{ min}^{-1}$ para la cala de Platja Gran.

Para evaluar cuantitativamente el desempeño del modelo numérico con respecto a los datos medidos, se obtiene el error medio RMS definido por Smith & Harkins (1997) como sigue.

$$RMS(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Dn_i - Dm_i}{Dm_i} \right) \times 100\% \quad (8.3)$$

donde N es el número de puntos a comparar, Dn_i es el dato numérico y Dm_i es el dato medido.

A fin de poder validar el modelo numérico con detalle, se obtiene el valor del error cuadrático medio para bandas de frecuencia discretizadas en ventanas de 10 datos espectrales consecutivos con una separación constante en el eje de las frecuencias igual a $\Delta f = 0.096 \text{ min}^{-1}$, partiendo de $f_i = 0.0 \text{ min}^{-1}$ y terminando en $f_f = 2.4 \text{ min}^{-1}$.

Las tablas 8.2, 8.3 y 8.4 muestran el resumen de los errores cuadráticos medios para los siete puntos de medición y las tres simulaciones numéricas realizadas respectivamente.

En primer lugar se hace constar que para todas las simulaciones, los valores de error en las primeras bandas de frecuencia encontradas en el sensor MW2, se deben a que las mediciones realizadas en campo para el sensor MW2 no son correctas, por lo tanto dichos errores no son representativas de la labor del modelo numérico.

De ahora en adelante cuando se hable sobre los sensores exteriores se hará referencia a los sensores MW1, MW2, MW3 y MW4. De la misma forma, cuando se mencionen los sensores localizados en el interior de las calas se hará referencia a los sensores M1, M0 y M2.

Fi	Ff	MW1	MW2	MW3	MW4	M1	M0	M2	
0	a	0.096	-0.1505067	-3.2019755	-0.1500564	-0.1308224	-0.1432604	-0.3500673	-0.2704503
0.096	a	0.192	-0.7964186	-3.0220218	-0.8544548	-0.8294585	-0.8677383	-1.3184471	-1.0673885
0.192	a	0.288	-4.0649473	-4.471594	-4.3926881	-4.2087221	-4.8647052	-6.0599982	-5.9350565
0.288	a	0.384	-6.9332906	-7.5253032	-7.9560668	-7.3000165	-9.0262047	-11.394945	-12.366632
0.384	a	0.48	-8.0758845	-9.0225906	-9.7598151	-8.6546325	-11.44843	-15.382334	-17.380818
0.48	a	0.576	-3.5148018	-4.2898773	-4.9654387	-3.9662653	-6.3785439	-11.041027	-13.671127
0.576	a	0.672	-3.77199	-5.201832	-6.3341493	-4.5198015	-9.0209687	-12.430574	-19.641978
0.672	a	0.768	-2.5794757	-3.7774249	-4.9197598	-3.1607146	-7.5992639	-16.215338	-16.750484
0.768	a	0.864	-1.4134264	-2.5510125	-3.6854736	-1.8210484	-6.5609952	-13.293974	-13.676344
0.864	a	0.96	-0.5781331	-1.1740218	-1.9023718	-0.6730825	-3.9388863	-16.60442	-15.84647
0.96	a	1.056	-1.0341772	-1.8920891	-2.1144793	-1.2355817	-5.5967342	-10.7907	-10.40388
1.056	a	1.152	-0.9545678	-1.9963864	-2.3784654	-1.1457166	-7.0491583	-4.551124	-8.194896
1.152	a	1.248	-0.3711379	-0.9988512	-1.4224053	-0.4531985	-5.5179745	-7.237335	-6.310765
1.248	a	1.344	-0.1916903	-0.7395543	-1.2352362	-0.2707332	-6.8431444	-2.6015637	-7.3862294
1.344	a	1.44	-0.179764	-0.7372838	-1.3482089	-0.1673503	-10.125551	-1.7694479	-5.7926833
1.44	a	1.536	-0.1172488	-0.5485235	-1.1575831	-0.0874398	-13.623549	-1.0250024	-4.0690229
1.536	a	1.632	-0.0244462	-0.249172	-0.6196689	-0.0217244	-13.446008	-0.4866355	-2.0353835
1.632	a	1.728	-0.0152888	-0.1319784	-0.4461355	-0.0093935	-14.907276	-0.2742596	-1.5012963
1.728	a	1.824	-0.0269501	-0.0564998	-0.2316135	-0.0152535	-19.953161	-0.1441418	-1.030131
1.824	a	1.92	-0.0170955	-0.0492254	-0.0710336	-0.0173492	-15.794395	-0.0968788	-0.3899459
1.92	a	2.016	-0.0095619	-0.0533957	-0.1125467	-0.0122063	-8.5297294	-0.0715584	-0.8744732
2.016	a	2.112	-0.0087769	-0.0552449	-0.1919547	-0.0129049	-4.5375602	-0.0700888	-1.5973248
2.112	a	2.208	-0.007774	-0.0265677	-0.1037937	-0.0146259	-1.3262888	-0.0469984	-1.5271721
2.208	a	2.304	-0.0053227	-0.0120957	-0.0632457	-0.0070415	-0.5345753	-0.0352861	-1.3867867
2.304	a	2.4	-0.0027457	-0.0082257	-0.025576	-0.0036366	-0.1434388	-0.0277876	-1.6462134

Tabla 8.2 Error medio de energía espectral para las bandas de frecuencia en cada punto de control. Caso rissaga.

Si se observan los valores de error relativo del modelo para los sensores exteriores para toda la banda frecuencial se tiene que éstos no sobrepasan el valor medio del 10% de error, considerándose como una reproducción adecuada del forzamiento exterior.

El sensor de Platja Gran (M1), es el que presenta un porcentaje de error mayor, especialmente para la banda $0.15 < f < 0.2 \text{ min}^{-1}$ con valores de 13%, situación que se repite en los sensores interiores cuando superan la frecuencia $f > 0.2$ con valores de porcentaje de error del 4%, posiblemente debido a que el tamaño de malla numérica no es lo suficientemente fina para representar adecuadamente la energía para valores frecuenciales superiores que contienen energías menores de $0.002 \text{ m}^2/\text{Hz}$.

Se tiene que para el caso de simulación de ondas con máxima energía (rissaga), tabla 8.2, los máximos errores cuadráticos medios rondan valores del 15% para la banda frecuencial de $0.48 < f < 1.15 \text{ min}^{-1}$ en los sensores interiores M0 y M2.

Fi	Ff	MW1	MW2	MW3	MW4	M1	M0	M2	
0	a	0.096	-0.1505067	-3.2019755	-0.1500564	-0.1308224	-0.1432604	-0.3500673	-0.2704503
0.096	a	0.192	-0.7964186	-3.0220218	-0.8544548	-0.8294585	-0.8677383	-1.3184471	-1.0673885
0.192	a	0.288	-4.0649473	-4.471594	-4.3926881	-4.2087221	-4.8647052	-6.0599982	-5.9350565
0.288	a	0.384	-6.9332906	-7.5253032	-7.9560668	-7.3000165	-9.0262047	-11.394945	-12.366632
0.384	a	0.48	-8.0758845	-9.0225906	-9.7598151	-8.6546325	-11.44843	-15.382334	-17.380818
0.48	a	0.576	-3.5148018	-4.2898773	-4.9654387	-3.9662653	-6.3785439	-11.041027	-13.671127
0.576	a	0.672	-3.77199	-5.201832	-6.3341493	-4.5198015	-9.0209687	-12.430574	-19.641978
0.672	a	0.768	-2.5794757	-3.7774249	-4.9197598	-3.1607146	-7.5992639	-16.215338	-16.750484
0.768	a	0.864	-1.4134264	-2.5510125	-3.6854736	-1.8210484	-6.5609952	-13.293974	-13.676344
0.864	a	0.96	-0.5781331	-1.1740218	-1.9023718	-0.6730825	-3.9388863	-16.60442	-15.84647
0.96	a	1.056	-1.0341772	-1.8920891	-2.1144793	-1.2355817	-5.5967342	-10.7907	-10.40388
1.056	a	1.152	-0.9545678	-1.9963864	-2.3784654	-1.1457166	-7.0491583	-4.551124	-8.194896
1.152	a	1.248	-0.3711379	-0.9988512	-1.4224053	-0.4531985	-5.5179745	-7.237335	-6.310765
1.248	a	1.344	-0.1916903	-0.7395543	-1.2352362	-0.2707332	-6.8431444	-2.6015637	-7.3862294
1.344	a	1.44	-0.179764	-0.7372838	-1.3482089	-0.1673503	-10.125551	-1.7694479	-5.7926833
1.44	a	1.536	-0.1172488	-0.5485235	-1.1575831	-0.0874398	-13.623549	-1.0250024	-4.0690229
1.536	a	1.632	-0.0244462	-0.249172	-0.6196689	-0.0217244	-13.446008	-0.4866355	-2.0353835
1.632	a	1.728	-0.0152888	-0.1319784	-0.4461355	-0.0093935	-14.907276	-0.2742596	-1.5012963
1.728	a	1.824	-0.0269501	-0.0564998	-0.2316135	-0.0152535	-19.953161	-0.1441418	-1.030131
1.824	a	1.92	-0.0170955	-0.0492254	-0.0710336	-0.0173492	-15.794395	-0.0968788	-0.3899459
1.92	a	2.016	-0.0095619	-0.0533957	-0.1125467	-0.0122063	-8.5297294	-0.0715584	-0.8744732
2.016	a	2.112	-0.0087769	-0.0552449	-0.1919547	-0.0129049	-4.5375602	-0.0700888	-1.5973248
2.112	a	2.208	-0.007774	-0.0265677	-0.1037937	-0.0146259	-1.3262888	-0.0469984	-1.5271721
2.208	a	2.304	-0.0053227	-0.0120957	-0.0632457	-0.0070415	-0.5345753	-0.0352861	-1.3867867
2.304	a	2.4	-0.0027457	-0.0082257	-0.025576	-0.0036366	-0.1434388	-0.0277876	-1.6462134

Tabla 8.3 Error medio de energía espectral para las bandas de frecuencia en cada punto de control.

Caso energía intermedia.

Los valores del error medio para el caso intermedio, tabla 8.3, en general, son mucho menores que los mostrados en la tabla 8.4, ya que las ondas simuladas son menos energéticas y las transformaciones energéticas tienden a conservar características más lineales que el caso de rissaga.

En general, se observa que para todos los sensores en la zona exterior, existe un error máximo que no supera el 1.5%.

De igual manera que para las simulaciones de rissaga, los porcentajes de error para las frecuencias superiores a $f > 0.2 \text{ min}^{-1}$ se mantienen menores al 1 % en todos los puntos.

El máximo error registrado es para la banda de frecuencias de 0.86 a 0.96 para el sensor M2, alcanzando un valor del 9.29%, siendo el sensor que sufre las mayores transformaciones energéticas dentro de las simulaciones del caso de energía intermedia.

Fi	Ff	MW1	MW2	MW3	MW4	M1	M0	M2	
0	a	0.096	-0.0333062	-1.867115	-0.0668542	-0.0417584	-0.0592667	-0.0816868	-0.057006
0.096	a	0.192	-0.0870144	-1.7635868	-0.1048192	-0.0856308	-0.1054571	-0.1189729	-0.1249973
0.192	a	0.288	-0.3131548	-1.0861013	-0.3001635	-0.2811705	-0.3162307	-0.3430196	-0.3719583
0.288	a	0.384	-0.2732242	-0.5360963	-0.3467973	-0.3244698	-0.404318	-0.4441454	-0.5010935
0.384	a	0.48	-0.233272	-0.3737512	-0.2804353	-0.2419326	-0.3244987	-0.412982	-0.478242
0.48	a	0.576	-0.0764755	-0.1693416	-0.1300692	-0.1055739	-0.160359	-0.2810107	-0.355001
0.576	a	0.672	-0.0813887	-0.1706471	-0.1322726	-0.1003246	-0.179407	-0.4168564	-0.5691845
0.672	a	0.768	-0.0537341	-0.1631321	-0.1146878	-0.0772371	-0.1765214	-0.6206714	-0.9338941
0.768	a	0.864	-0.0260479	-0.0856084	-0.0664233	-0.0331173	-0.1154318	-0.9009227	-1.4694196
0.864	a	0.96	-0.012085	-0.041844	-0.039034	-0.0115946	-0.0742196	-4.5457866	-8.025282
0.96	a	1.056	-0.008015	-0.0276043	-0.0123351	-0.008152	-0.0286186	-2.6730969	-4.9893368
1.056	a	1.152	-0.0064163	-0.0248808	-0.0110424	-0.0053958	-0.0315586	-0.2092899	-0.4330199
1.152	a	1.248	-0.0027329	-0.01485	-0.0067042	-0.0022488	-0.0273724	-0.0375621	-0.0975485
1.248	a	1.344	-0.0017873	-0.0138458	-0.0050197	-0.0013541	-0.0240951	-0.014299	-0.0523141
1.344	a	1.44	-0.0010784	-0.0116451	-0.0035249	-0.0006937	-0.0230344	-0.0057326	-0.0224648
1.44	a	1.536	-0.0008621	-0.009529	-0.0031389	-0.0005283	-0.0296638	-0.0026824	-0.0167862
1.536	a	1.632	-0.0007978	-0.0075141	-0.0026049	-0.0003762	-0.0606378	-0.0027282	-0.0116755
1.632	a	1.728	-0.0007941	-0.006533	-0.0041294	-0.0004757	-0.2038513	-0.0030565	-0.0208182
1.728	a	1.824	-0.000833	-0.0037754	-0.0013858	-0.0004027	-0.3519087	-0.0017085	-0.0105948
1.824	a	1.92	-0.0007192	-0.0046028	-0.0007596	-0.0004152	-0.1439671	-0.0018273	-0.0091133
1.92	a	2.016	-0.0004602	-0.0045157	-0.0008043	-0.0004036	-0.0298789	-0.0021462	-0.0129259
2.016	a	2.112	-0.0004866	-0.0030126	-0.0009691	-0.0004621	-0.0161183	-0.002822	-0.0235859
2.112	a	2.208	-0.0005415	-0.0043441	-0.0021147	-0.0005083	-0.0196921	-0.0034647	-0.0557618
2.208	a	2.304	-0.0005533	-0.0037633	-0.0019381	-0.0005405	-0.0150564	-0.0029501	-0.0777547
2.304	a	2.4	-0.000611	-0.0025772	-0.0031107	-0.0004604	-0.0170071	-0.0029939	-0.1055378

Tabla 8.4 Error medio de energía espectral para las bandas de frecuencia en cada punto de control.

Caso energía baja.

Para el caso de baja energía, los sensores exteriores e interiores mantienen valores medios de error relativo aproximadamente menores al 0.5%, para las frecuencias más bajas de $f < 0.48 \text{ min}^{-1}$.

Para la zona interior, los errores relativos no superan el 5%, mostrando que esta simulación correspondiente a la energía incidente más baja es la que mejores correlaciones arroja, debido a la linealidad que este caso representa.

En resumen, la reproducción numérica de los eventos de baja, media y alta energía seleccionados, muestra un buen comportamiento desde el punto de vista energético, logrando evaluar las trasferencias energéticas medias con precisión para los siete puntos comparados.

8.5.3 Factores de amplificación

En el apartado anterior se observó que los valores espectrales obtenidos numéricamente para cada sensor, arrojaron buenas correlaciones con errores relativos en general menores al 10%, con respecto a los datos medidos durante la campaña de campo LAST-97.

En este apartado se presentan las gráficas de los coeficientes de amplificación relativa dentro de cada una de las calas de Ciutadella y Platja Gran. Dichas gráficas permiten la observación directa de los posibles efectos de acoplamiento entre las dos dársenas portuarias, además de que suponen una forma práctica de representar el comportamiento general de cada cala y sus posibles efectos resonantes.

El análisis comparativo que se utiliza para determinar los coeficientes de amplificación dentro de las calas de Ciutadella y Platja Gran, se lleva a cabo con la obtención de los espectros de energía para los dos sensores ubicados dentro de cada cala (M1 y M2), comparados con un sensor situado en el exterior del sistema acoplado de bocanas (MW4), aplicando la función de respuesta energética siguiente:

$$A = \sqrt{\frac{Sf_{M1,2}}{Sf_{MW4}}} \quad (8.4)$$

donde A es la respuesta de amplificación para cada bocana, $Sf_{M1,2}$ es el espectro para los sensores M1 y M2 respectivamente, y Sf_{MW4} es el espectro de energía calculado para el sensor externo MW4.

Los espectros fueron obtenidos con la densidad espectral utilizando una función psd (*power spectral density*), con el método modificado de promedios de Welch para media ventana tipo Kaiser-Bessel de 512 puntos.

La figura 8.20 presenta los coeficientes de amplificación obtenidos numéricamente para las simulación de energía alta (rissaga), comparados con la respuesta de amplificación medida en campo para el mismo episodio. Se dibujan en línea continua los correspondientes a la campaña de campo, y el línea y punto los valores obtenidos numéricamente.

Las amplificaciones obtenidas para primer modo de oscilación de las bocanas de Ciutadella y Platja Gran $f=0.098 \text{ min}^{-1}$ y $f=0.18 \text{ min}^{-1}$ respectivamente, demuestran el buen comportamiento del modelo numérico con errores relativos de aproximadamente 5%, observándose este comportamiento tanto para magnitudes de amplificación como para la forma de la curva de respuesta para las frecuencias colindantes.

Los valores de amplificación en ambas calas comienzan a divergir de aquellos medidos en campo, a partir de frecuencias mayores a $f>0.4 \text{ min}^{-1}$, posiblemente debido a la limitación en el tamaño de elementos dentro de las calas.

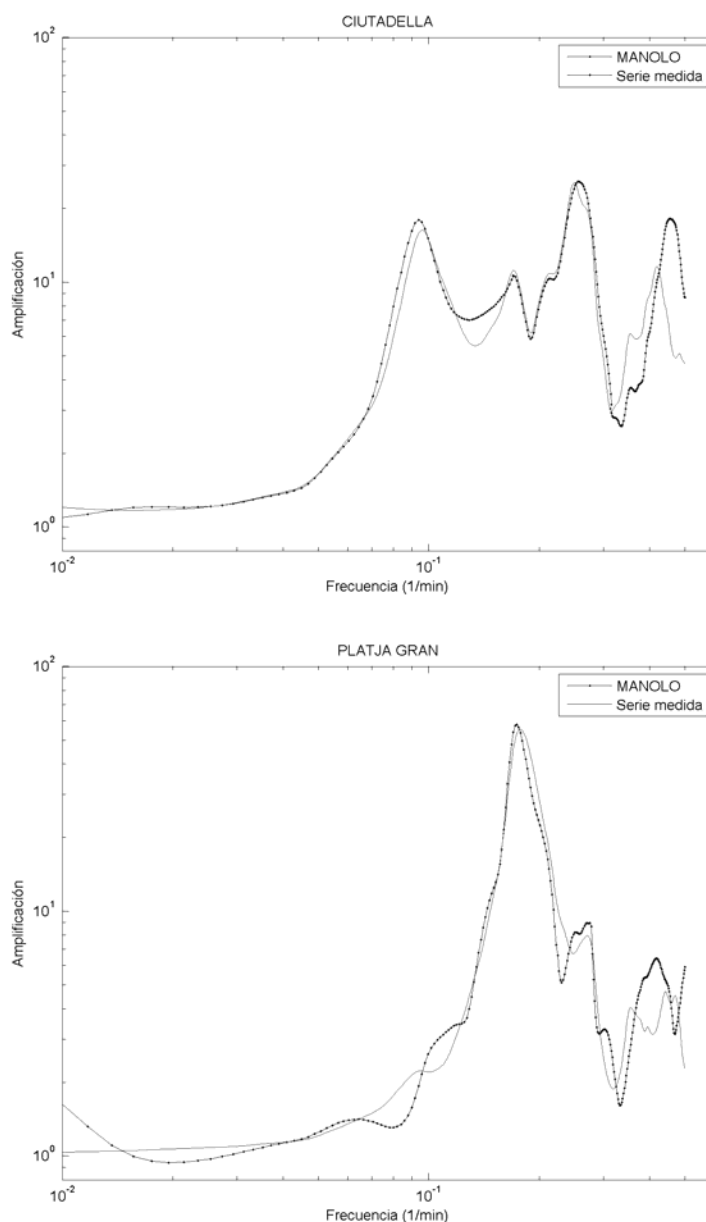


Figura 8.20 Coeficiente de amplificación relativa en Ciutadella y Platja Gran el caso rissaga. Numérico (puntos), medido (línea).

Finalmente al observar la figura 8.20, se verifica que el modelo numérico toma en cuenta las respuestas energéticas propias de un sistema acoplado de dos bocanas, haciendo aparecer los picos energéticos debido a los posibles efectos combinados entre bocanas, de esta forma logra combinar las posiciones frecuenciales del primer modo de oscilación para cada bocana, $f=0.098 \text{ min}^{-1}$ para Platja Gran, y $f=0.18 \text{ min}^{-1}$ para Ciutadella.

8.5.4 Análisis con la técnica *wavelet*

La técnica de análisis de Fourier mostrada en apartados anteriores, se encarga de recomponer una serie de ondas dada en una suma de funciones sinusoidales, tomando como hipótesis de partida la estacionalidad y periodicidad del fenómeno a ser considerado.

El uso de la transformada de Fourier tradicional permite la determinación de las frecuencias principales del registro, definiendo el comportamiento energético medio de la señal, sin ser capaz de proporcionar información sobre la ocurrencia temporal de cada proceso.

Los fenómenos de resonancia portuaria en general, y particularmente aquellos que se generan por efectos atmosféricos o rissagas, distan mucho de comportarse como un fenómeno periódico y/o estacionario, pudiéndose encontrar registros temporales de superficie libre con características inéditas para cada episodio resonante.

El uso de la transformada wavelet, como se ha visto en capítulos anteriores, permite la visualización temporal y energética de los procesos asociados a la resonancia portuaria, con la capacidad de localizar en el dominio del tiempo, todas y cada una de las transformaciones que sufren las ondas antes, durante y después del episodio resonante.

En este apartado se utiliza la técnica de la transformada wavelet para verificar las capacidades numéricas del modelo MANOLO dentro del tratamiento del fenómeno de resonancia portuaria, con la finalidad de poder identificar la reproducción de los posibles efectos no lineales y de acoplamiento entre Ciutadella y Platja Gran a lo largo del tiempo de simulación numérica.

Para este análisis se optó por la utilización de una función madre tipo Morlet, altamente recomendada para el tratamiento de registros de superficie libre y velocidades tanto numéricas como medidos en campo dentro de la ingeniería de costas, Liu (2000), López (2002), De Joung & Battjes (2004).

Las figuras 8.21 a 8.23 muestran los espectros wavelet para el episodio de máxima energía o rissaga, para todo el registro temporal y para los sensores MW4, M1 y M2, comparados con los espectros wavelets para los registros medidos en campo para los mismos sensores. Las magnitudes energéticas se representan en escala logarítmica para obtener mayor contraste de colores.

De igual forma las figuras 8.24 a 8.29 muestran los resultados respectivos en los mismos puntos para las series de energía baja e intermedia.

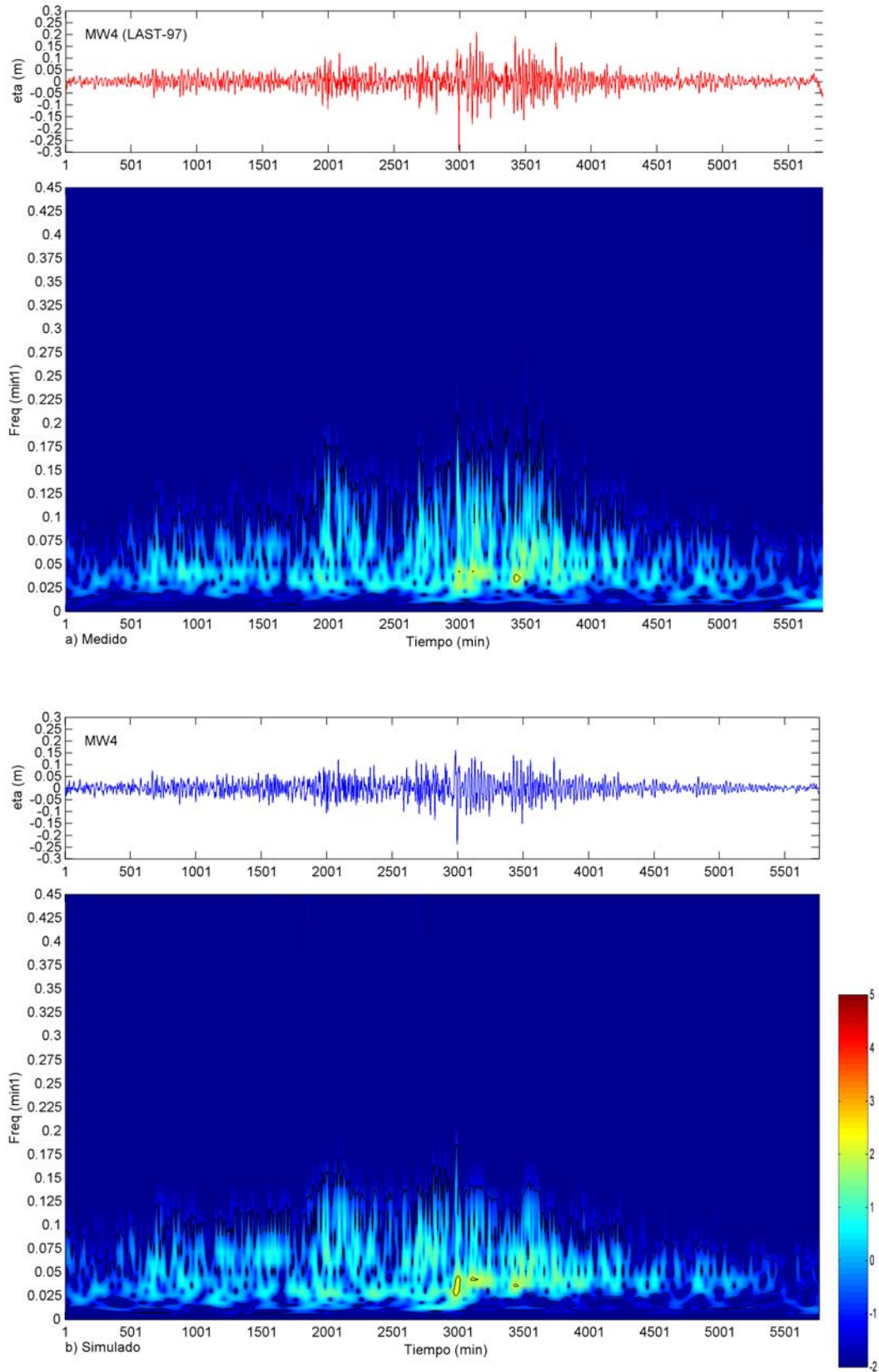


Figura 8.21 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor MW4. Caso rissaga. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

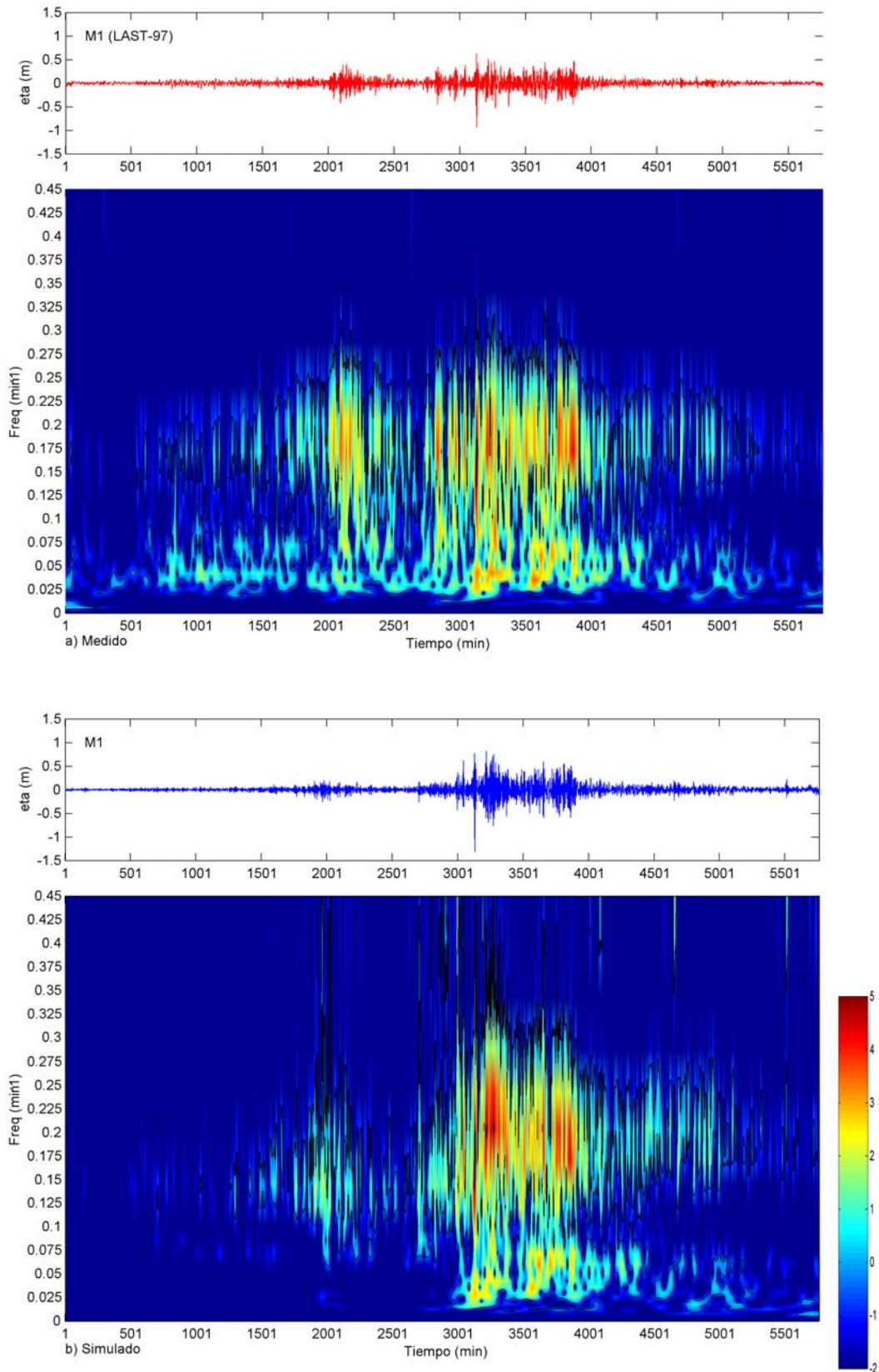


Figura 8.22 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M1. Caso rissaga. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

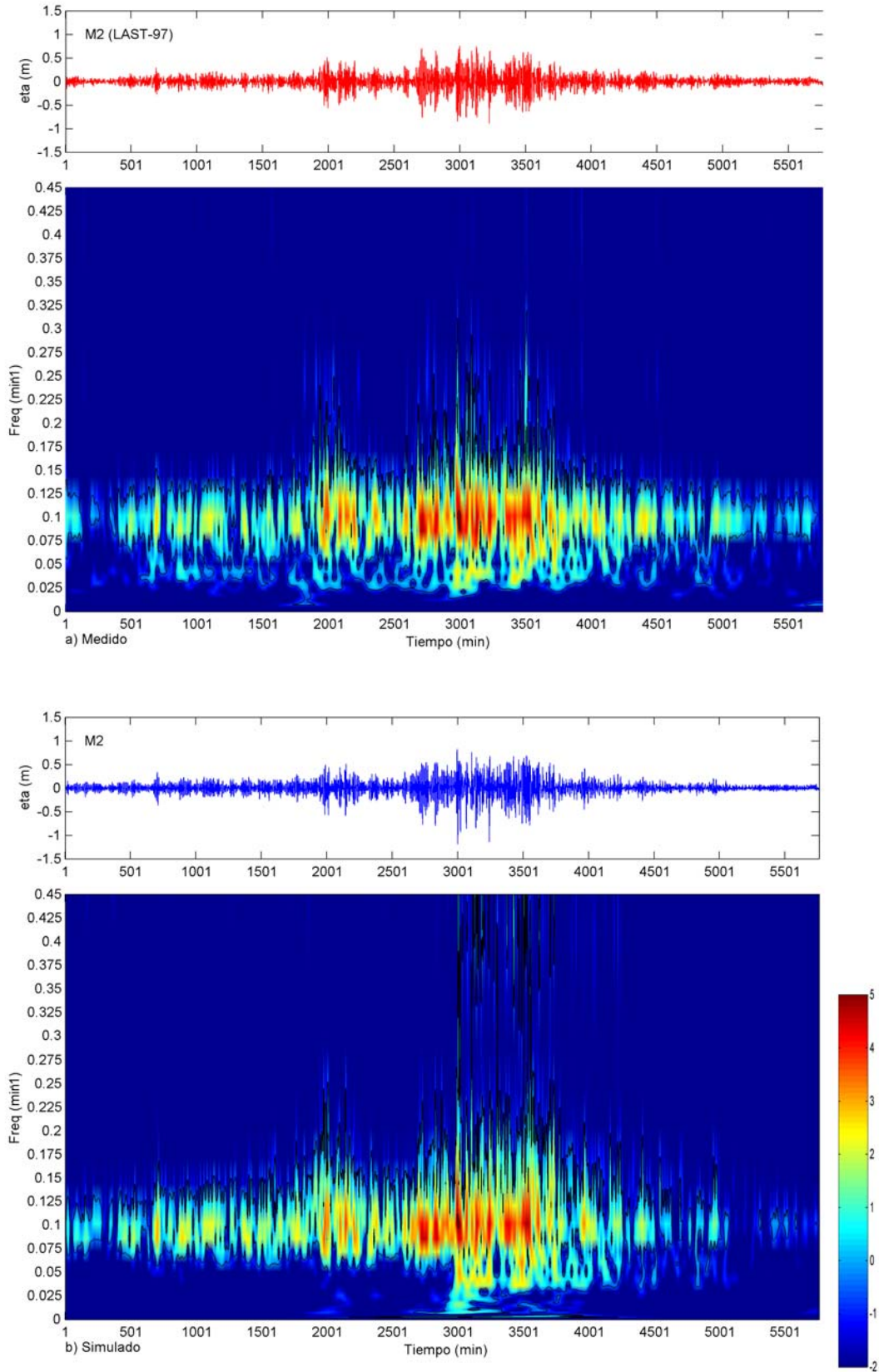


Figura 8.23 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M2. Caso rissaga. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

Las series de figuras anteriores que corresponden al caso de energía máxima o rissaga, demuestran que el modelo numérico reproduce los procesos temporales que sufre la superficie libre bajo los efectos resonantes del fenómeno de rissaga, tanto fuera de las calas naturales como dentro del puerto de Ciutadella y Platja Gran.

El sensor exterior MW4, figura 8.21, mantiene una energía constante en la línea frecuencial $f=0.03 \text{ min}^{-1}$, durante prácticamente todo el registro temporal. La primera transformación energética importante aparece en el tiempo $t=600 \text{ min}$ aproximadamente, mostrando una transferencia de parte de la energía incidente hacia la banda de frecuencias $0.05 < f < 0.075 \text{ min}^{-1}$, con importantes paquetes energéticos cerca del tiempo $t=3000 \text{ min}$ y hacia $t=3500 \text{ min}$, que corresponden al forzamiento atmosférico o rissaga, haciendo que en ocasiones la transferencia energética invada la banda de frecuencias $0.1 < f < 0.175 \text{ min}^{-1}$.

El modelo numérico logra localizar perfectamente dichos paquetes de energía en el dominio del tiempo para el forzamiento exterior, reproduciendo las transferencias energéticas entre frecuencias, y la magnitud de la energía para cada instante de tiempo, inclusive localizando con precisión los paquetes de máxima energía en el exterior antes mencionados. Esto demuestra que el área de generación y el dominio computacional tienen un buen comportamiento en toda la simulación. Además, se pone de manifiesto que los contornos numéricos y batimetrías exteriores representan con fidelidad las condiciones reales.

Dentro de la cala de Platja Gran, el sensor M1 para el caso simulado de rissaga, figura 8.22, presenta las modelaciones numéricas menos acertadas en comparación con las transformadas wavelet realizadas con la serie de campo.

Para este sensor M1, el modelo subestima las dos grandes ramas energéticas que se imponen a lo largo de todo el registro para el sensor M1. En la primera banda frecuencial $0.05 < f < 0.075 \text{ min}^{-1}$, el modelo logra reproducir los patrones energéticos hasta superar el tiempo $t > 3000 \text{ min}$, posiblemente debido a que la energía en esa banda frecuencial es baja y se ve disipada por los mecanismos de fricción en el fondo.

La segunda rama de frecuencias que se distingue en la transformación de las ondas dentro de la cala de Platja Gran corresponde a $0.1 < f < 0.275 \text{ min}^{-1}$, siendo ésta la banda frecuencial que presenta una mayor transformación energética dentro de todos los puntos observados en el dominio. Dicha energía es simulada correctamente por el modelo numérico, presentando únicamente pequeñas diferencias en la rama frecuencial más alta.

De igual forma el espectro wavelet generado para el sensor M2 mostrado en la figura 8.23, que representa el desarrollo temporal de las ondas dentro del puerto de Ciutadella, a diferencia del sensor M1, presenta una mejor correlación con el espectro wavelet generado con los datos de campo, localizando en el tiempo los paquetes energéticos con gran semejanza en las magnitudes alcanzadas en cada paso de tiempo. Por otro lado, se observa nuevamente la existencia de ruido numérico en forma de energía en las frecuencias más altas $f > 0.4 \text{ min}^{-1}$, particularmente para los paquetes energéticos con mayor intensidad (rissaga), que no parece repercutir de forma negativa en los resultados generales.

Las figuras siguientes que corresponden al caso de energía intermedia, 8.24 a 8.26 y energía baja 8.27 a 8.29, mantienen una calidad similar en las correlaciones con respecto a los valores de energía temporal obtenidos para los registros medidos.

Los espectros wavelet para el registro numérico del punto MW4 y para los dos casos mencionados, muestran una energía constante que se conserva a lo largo de la simulación en los límites frecuenciales $0.025 < f < 0.05 \text{ min}^{-1}$, reproduciendo adecuadamente la energía intermitente que se presenta dentro de los límites $0.05 < f < 0.075 \text{ min}^{-1}$, mostrando las mayores diferencias en las frecuencias superiores a $f > 0.4 \text{ min}^{-1}$ en forma del ruido numérico que sistemáticamente se manifestó en todos los puntos en mayor o menor medida.

Para el sensor M1, se observa que el modelo trasfiere la energía desde los primeros minutos hacia la banda de frecuencias $0.15 < f < 0.225 \text{ min}^{-1}$ logrando conservar los paquetes energéticos y magnitudes del espectro wavelet obtenido con respecto al registro medido en campo. Para el caso de energía intermedia, el espectro wavelet obtenido para el sensor numérico M1 reproduce con precisión las máximas energías ubicadas entre los tiempos $4000 < t < 4500 \text{ min}$.

Finalmente, si se observan los resultados representados en forma de espectros wavelet para los datos numéricos dentro del puerto de Ciutadella (sensor M2), se tiene que el modelo conserva las características temporales de los registros de campo, logrando reconstruir la energía no existente en el registro medido en campo para el tiempo $t=2500 \text{ min}$ aproximadamente, figura 8.26, quedando de manifiesto que el modelo numérico MANOLO es una herramienta útil y avanzada para el estudio de agitación portuaria en general y en particular para la simulación de los efectos asociados al fenómeno de resonancia portuaria.

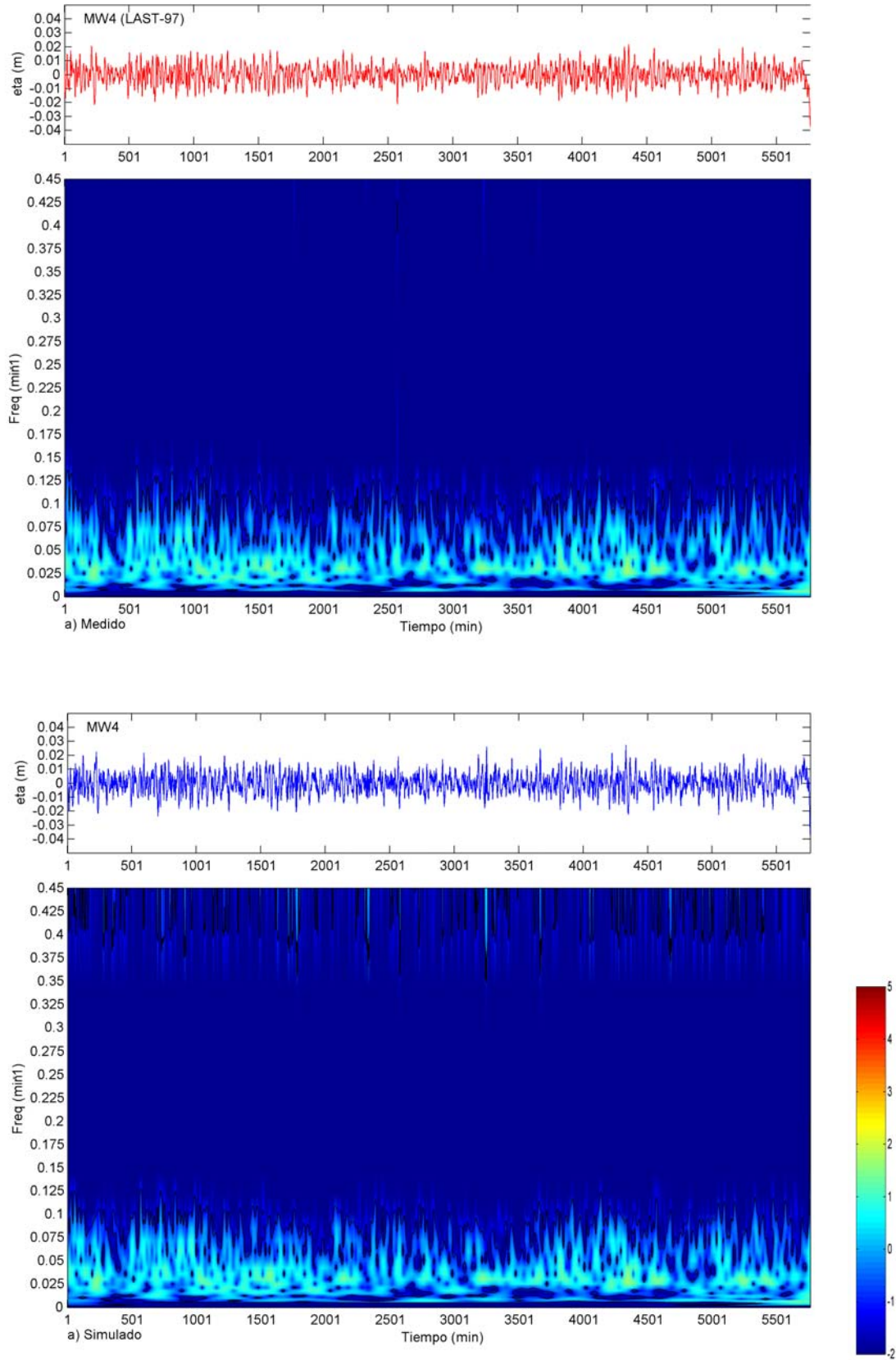


Figura 8.24 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor MW4. Caso energía intermedia. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

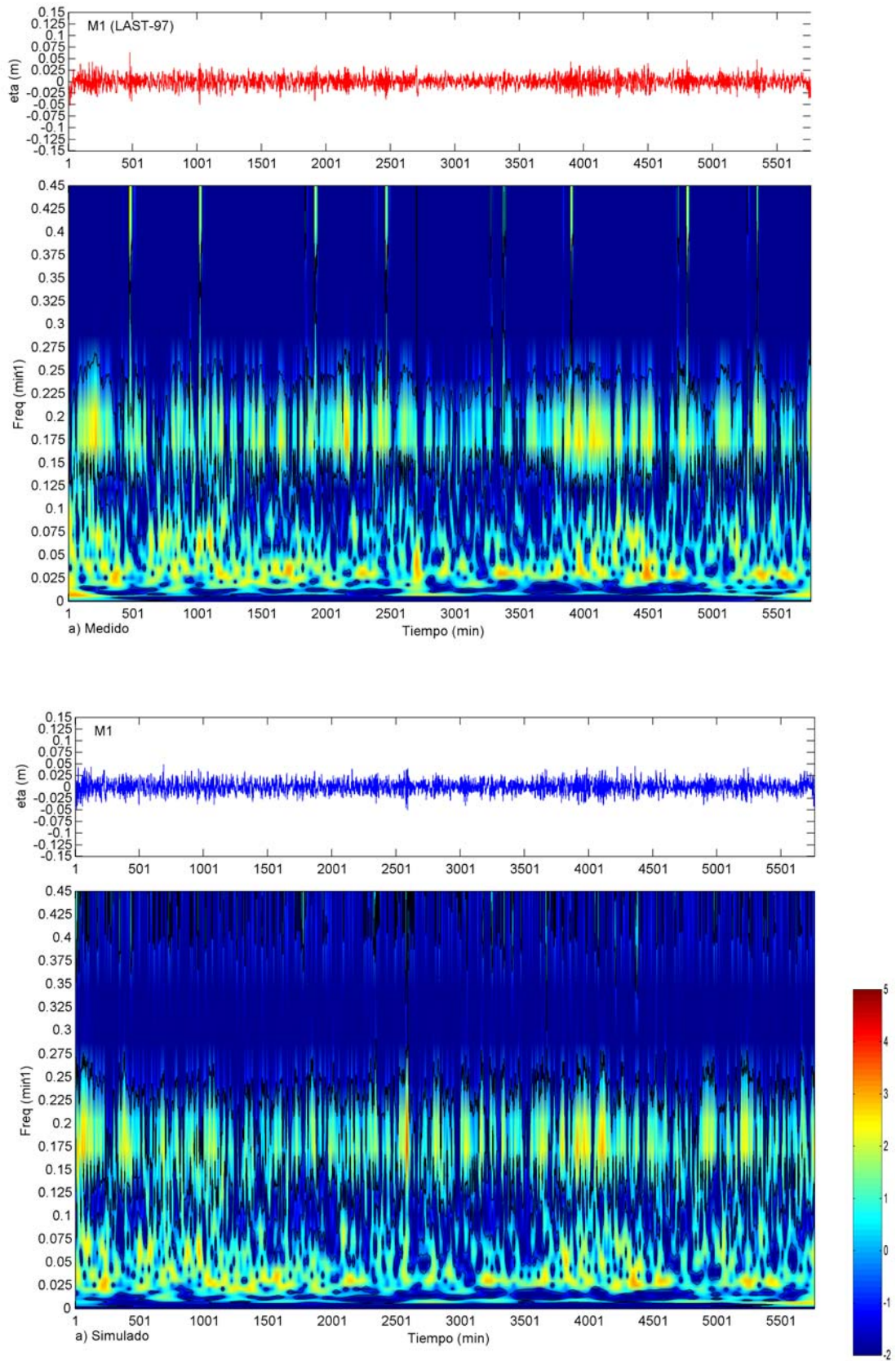


Figura 8.25 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M1. Caso energía intermedia. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

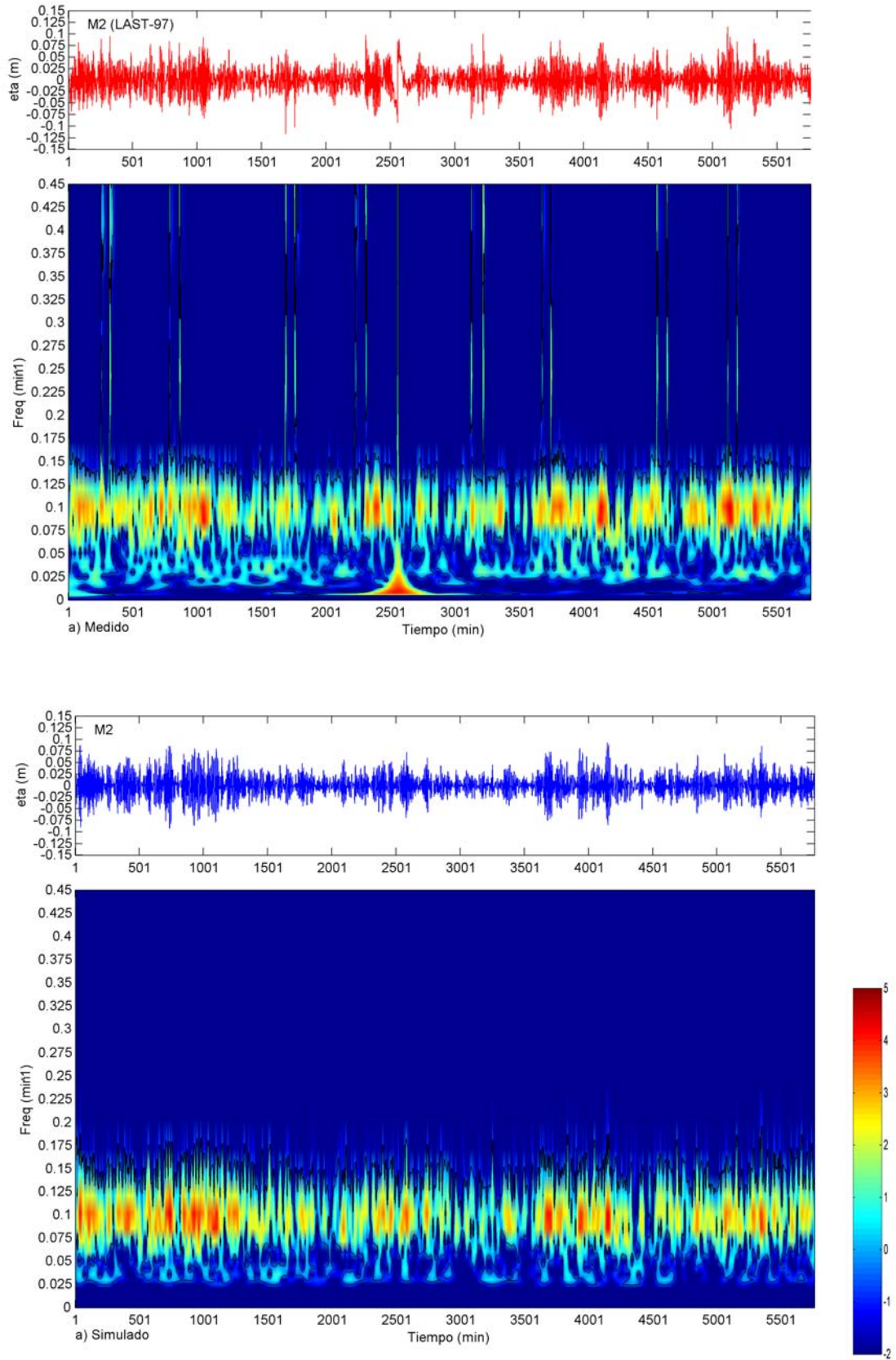


Figura 8.26 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M2. Caso energía intermedia. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

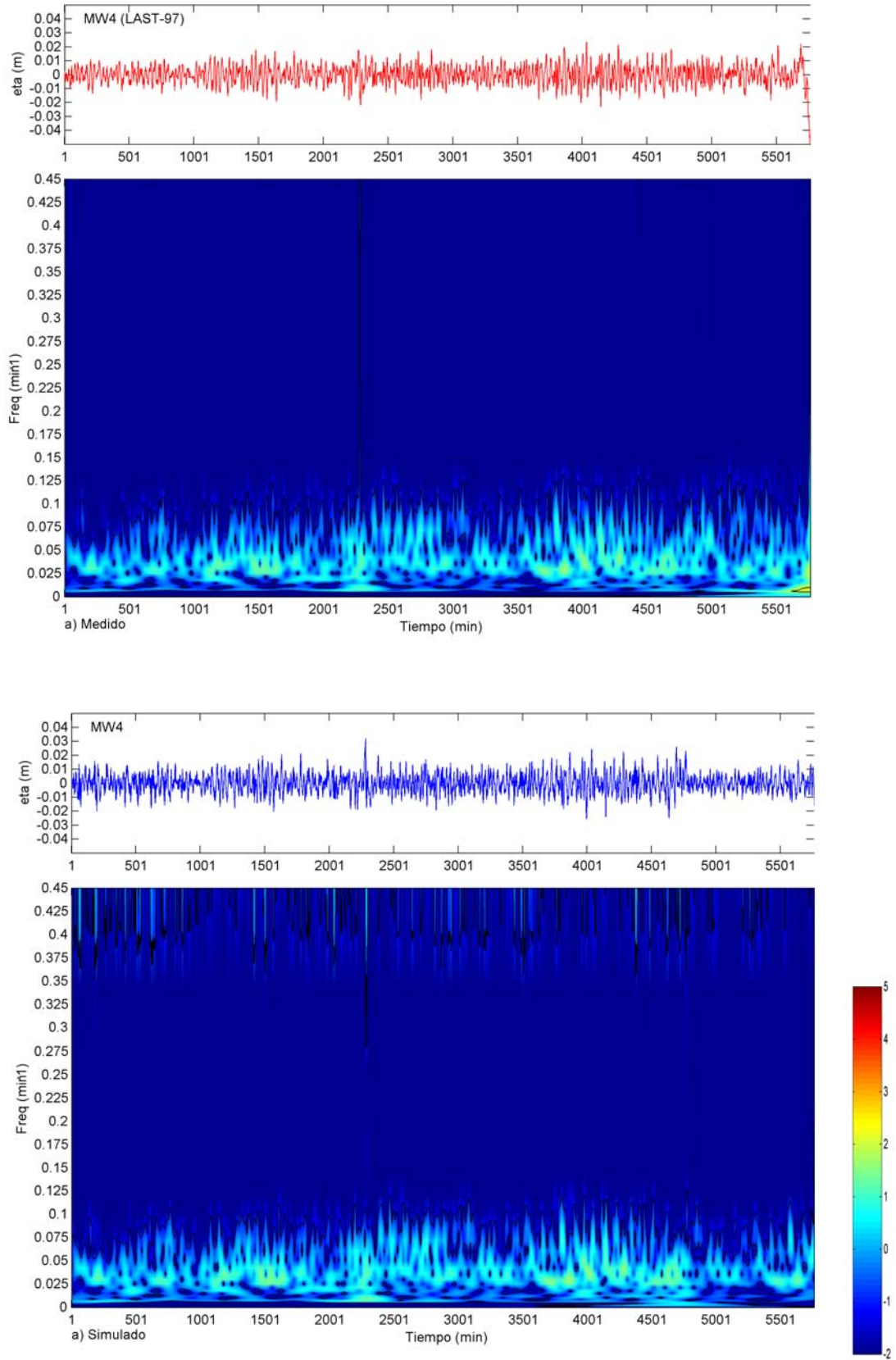


Figura 8.27 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor MW4. Caso energía baja. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

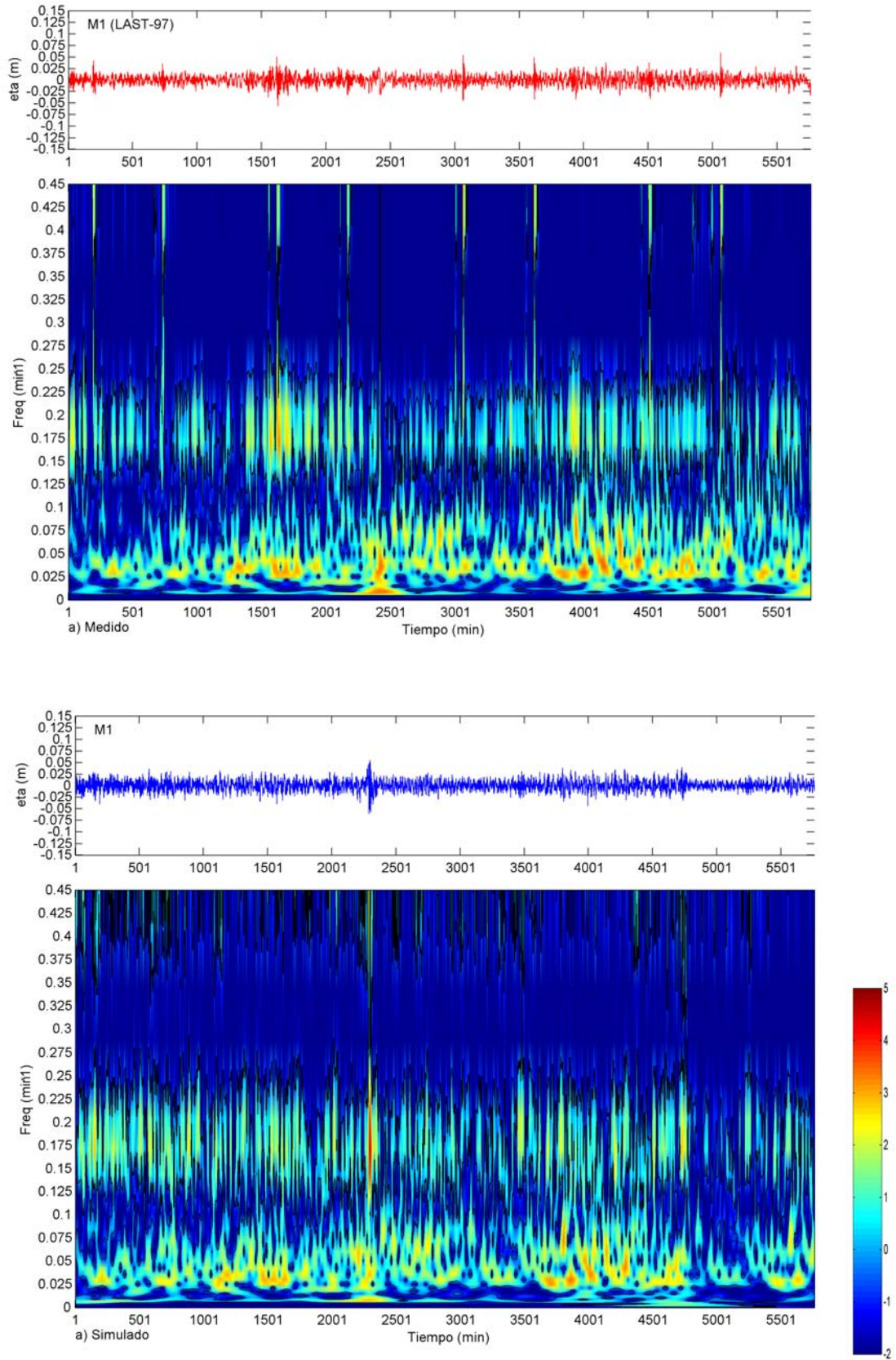


Figura 8.28 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M1. Caso energía baja. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

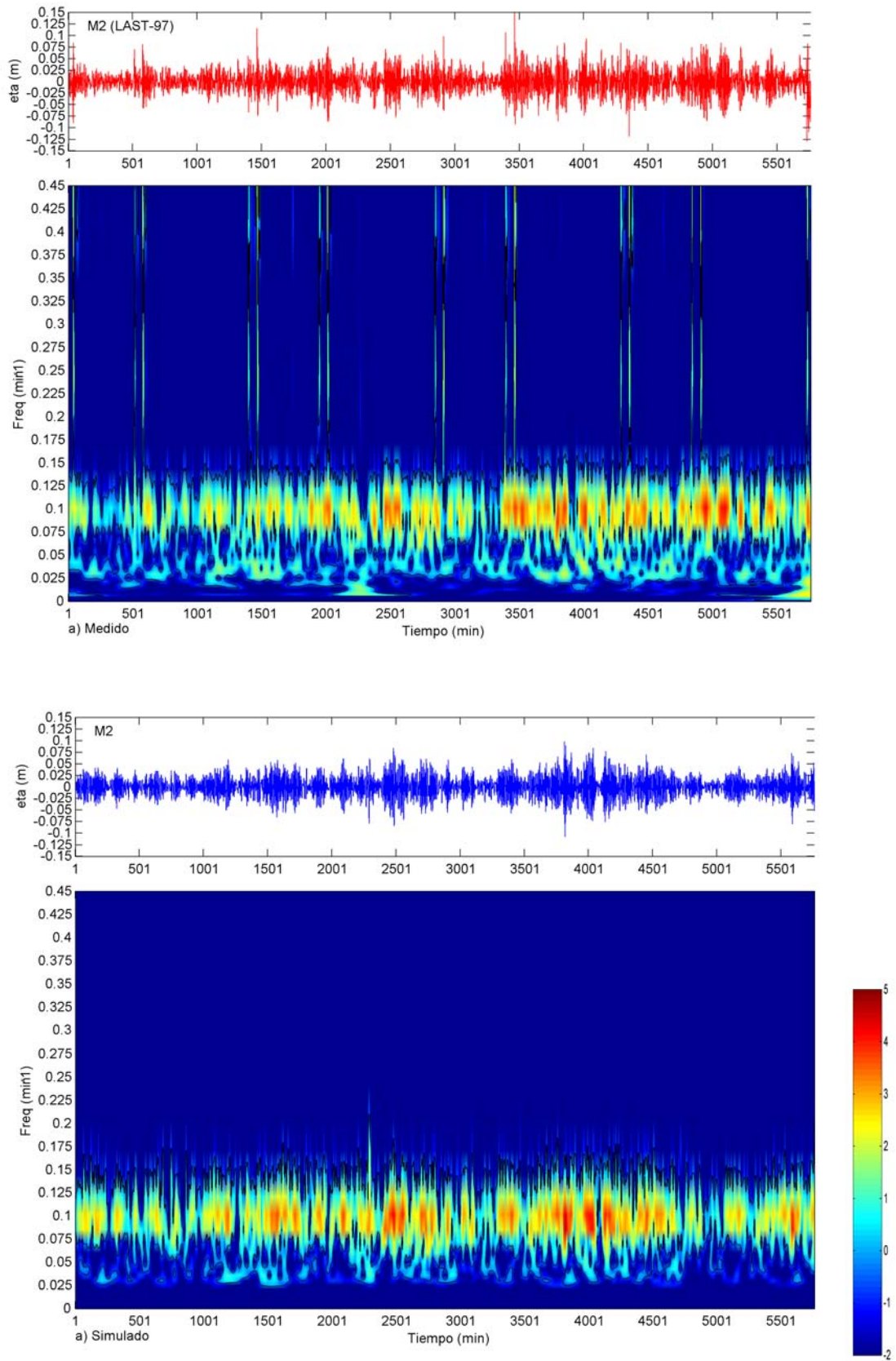


Figura 8.29 Registro de superficie libre y transformada wavelet para el sensor M2. Caso energía baja. Serie medida (rojo), serie simulada (azul), a) wavelet de la serie medida, b) wavelet de la serie numérica.

8.6 CONCLUSIONES

8.6.1 Conclusiones

Tras las ejecuciones numéricas realizadas en este capítulo y con el objetivo final de poder evaluar las diferentes capacidades que el modelo numérico MANOLO ofrece, se ha puesto de manifiesto que el modelo es una herramienta alternativa, práctica, de gran valor y utilidad para la ingeniería portuaria a la hora de acometer un estudio de agitación portuaria con características resonantes.

La aplicación del modelo no solo se limita a resolver situaciones idealizadas y/o simplificadas como se observó en el capítulo anterior, si no que se ha demostrado la viabilidad de su aplicación a una problemática real que incluye complejas geométricas en los contornos y batimetrías, diversas características de ondas irregulares, e importantes procesos de alta complejidad asociados a la transformación de las ondas dentro y fuera del puerto, con importantes transferencias de energía, disipación, acoplamiento y no linealidad a lo largo del tiempo.

El modelado con el modelo numérico MANOLO, permite la definición de la superficie libre, velocidades y presiones de manera directa en cualquier punto del dominio computacional, resolviendo grandes zonas de estudio.

La definición de las velocidades o la superficie libre se realiza sin ninguna hipótesis previa del comportamiento de dichas variables, y únicamente como trabajo previo a las simulaciones, se deben de seguir una serie de recomendaciones en el diseño geométrico para cada caso particular, en la asignación las dimensiones del dominio computacional, el área de generación del oleaje, y las características de la malla en elementos finitos triangulares no estructurados.

El trabajo de calibración del modelo numérico es simple y se enfoca básicamente en la determinación de los parámetros que controlan los procesos de disipación de energía por fricción en el fondo, encontrándose buenos resultados con la asignación directa del tamaño de grano D_{50} o el coeficiente de Chezy para el material del fondo, tomando los valores de las recomendaciones del estudio previo realizado en campo.

En los resultados de las simulaciones numéricas para el caso de rissaga o energía máxima, energía intermedia y energía baja, se observa una buena reproducción de las medidas de superficie libre por parte del modelo. Las capacidades del modelo se analizaron por tres vías de análisis principales. En primer lugar, se compararon los registros temporales de superficie libre obtenidos numéricamente con aquellas medidas tomadas durante la campaña LAST-97, situación prácticamente inédita en la literatura en relación con la aplicación de modelos de Boussinesq hacia problemas de la agitación portuaria y resonancia, ya que tradicionalmente se ha venido utilizado un espectro equivalente como elemento forzador de las simulaciones, perdiendo de esta forma la valiosa información en las fases del forzamiento incidente.

En segundo lugar, se aplicó una técnica de análisis de la energía espectral media basada en la utilización de la transformada discreta de Fourier a los registros temporales de superficie libre, obteniéndose en general buenas correlaciones con porcentajes de error menores al 10% para aquellos picos energéticos de mayor relevancia, tanto para los sensores situados en el exterior, como para aquellos que representan las mayores transformaciones en el interior de las calas de Ciutadella y Platja Gran.

La información que arrojaron los espectros de energía permite resaltar las virtudes y debilidades que el modelo presenta, encontrándose que a pesar de que los resultados mostrados alcanzaron correlaciones satisfactorias, existen aún una serie de discrepancias encontradas a la hora de obtener las curvas de amplificación para cada uno de los tres casos simulados. Dichas curvas numéricas de respuesta de amplificación han permitido una observación rápida de las importantes trasferencias de energía que se presentan a lo largo de su transformación espacial hacia el interior de las calas, situación que el modelo logra gestionar adecuadamente para las frecuencias más bajas, y obteniendo las mayores discrepancias conforme la energía se transporta hacia las frecuencias más altas probablemente debido a la limitación de las dimensiones de los elementos de la malla

numérica. Así mismo, han permitido la observación de los posibles efectos de acoplamiento que existen entre las dársenas durante los episodios de resonancia por efectos de rissaga.

En tercer lugar y siguiendo la tónica de análisis propuesto en esta Tesis, se decidió aplicar la técnica espectral wavelet para observar el funcionamiento del modelo a lo largo de reproducir la transitoriedad del problema, en los registros con y sin resonancia, obteniéndose muy buenos resultados, especialmente para el caso de rissaga en donde el contraste de los diferentes paquetes energéticos que se suceden en el tiempo permite una visualización clara directamente en el espectro wavelet.

La aplicación del espectro wavelet permitió localizar en el tiempo aquellas divergencias que el modelo numérico presenta con respecto a los datos medidos. Se observaron sistemáticamente oscilaciones de baja energía y alta frecuencia $f > 0.4 \text{ min}^{-1}$, con respecto a la energía y a las frecuencias propias de los registros del forzamiento incidente. Estas oscilaciones artificiales se deben posiblemente a pequeñas inestabilidades numéricas por efecto de una pobre resolución en ciertas zonas de malla numérica, especialmente para las zonas más someras de dominio. Sin embargo, los resultados obtenidos no se ven afectados por estas perturbaciones.

8.6.2 Aspectos a mejorar del modelo

Una vez analizado el modelo y habiéndolo sometido a episodios resonantes, y a forzamientos con energías medias distintas, se pueden puntualizar una serie de aspectos a mejorar en el manejo del modelo, en general para todos casos de simulación en donde se involucren estudios de agitación portuaria, y particularmente para el estudio de la resonancia en puertos.

- a) Mejorar las características del mallado en elementos finitos, para que el diseño de los elementos triangulares se realice considerando los fuertes estrechamientos geométricos con fondos someros como los son las bocanas de los puertos. Esto permitirá una mejor definición de la transformación de las ondas hacia frecuencias más altas dentro de las bocanas portuarias.
- b) Comprobación de las magnitudes de velocidad en la superficie, en la profundidad z_α , y en el fondo, con datos medidos en campo, especialmente para aquellos puntos de especial interés como lo son las bocanas y la zona de radiación exterior de los puertos.
- c) Establecer un registro de los tiempos de computación para diversos casos de ondas incidentes y dimensiones de dominio.
- d) Implementar las oscilaciones de marea astronómica dentro de la función de generación, proponiendo una técnica numérica para la estabilización de los contornos bajo influencia de oscilaciones de ondas cuyas longitudes superen las dimensiones del dominio numérico, como es el caso de las mareas astronómicas.