

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 4
ONDAS LARGAS, ANÁLISIS Y GENERACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

La agitación portuaria debida a las oscilaciones de onda corta ha sido ampliamente estudiada a través de técnicas y metodologías diversas, que la ingeniería de puertos ha venido utilizando tradicionalmente durante las últimas décadas. Dichas técnicas proponen la realización de trabajos de simulación tanto numérica como de laboratorio aplicadas a un sinfín de sistemas portuarios con innumerables problemáticas. Además éstas proveen una amplia base de datos en cuanto a la medición de datos de oleaje en campo se refiere, y establecen una extensa metodología para al análisis estadístico y espectral de las series temporales del oleaje de onda corta.

En contraste con lo anterior, el estado del arte proporciona menos información a la hora de proponer estudios sobre los efectos de agitación portuaria y el análisis de series de oleaje para la rama de energía infragravitatoria. Dichas ondas infragravitatorias también denominadas oscilaciones de largo periodo son, en la mayoría de los casos las causantes directas de los episodios de resonancia portuaria, que se traducen en graves problemas de operatividad de los puertos.

De esta forma, es imperativo que cualquier estudio de agitación portuaria debe de contar con un régimen de oscilaciones que considere la existencia de las ondas infragravitatorias, a través de una completa caracterización del clima marítimo no solo para las oscilaciones de corto periodo si no aplicado a todo el rango energético de frecuencias.

La obtención y caracterización del clima marítimo para las oscilaciones de corto periodo se realiza de manera rutinaria, hoy en día, a través de la utilización de un conjunto de metodologías bien establecidas que se alimentan de los datos obtenidos mediante boyas escalares y direccionales, mediciones visuales en barcos, y/o datos resultantes de modelos de retro-análisis, resultando en una amplia base de datos que permite la determinación adecuada de la altura, dirección y periodo del oleaje, así como sus estadísticos principales.

El constante crecimiento de las bases de datos, permite la obtención de las funciones de probabilidad de ocurrencia de los parámetros característicos del oleaje de corto periodo, así como de la forma en que se distribuye la energía a través de una configuración espectral del oleaje.

Lamentablemente, en el caso de la onda larga, estas metodologías no son aplicables debido a que no existen estudios definitivos que se encarguen de proponer una metodología capaz de determinar con fiabilidad la función de distribución de las características de la energía de onda larga, así como su configuración espectral tipo. Esto sería definitivo para una adecuada consecución de un estudio de clima marítimo.

En este capítulo se propone un análisis metodológico de las características de las oscilaciones de largo periodo y su relación con las ondas de corto periodo, tomando una serie de datos experimentales, medidos en el Puerto de Gijón y Puerto de Lastres, ambos situados en el Principado de Asturias.

4.2 OBJETIVO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS ONDAS LARGAS

Dentro del estudio de las ondas largas como posible elemento forzador de la resonancia, se plantean los objetivos siguientes, que establecen las bases necesarias para el entendimiento de las posibles génesis de episodios de resonancia portuaria y sus efectos posteriores.

El objetivo fundamental es presentar una metodología basada en el análisis espectral para la determinación de las características de las ondas infragravitatorias a partir de mediciones de oleaje real, aplicado a la bocana del Puerto de Gijón y a la zona exterior del puerto de Lastres,. Para ello, se utilizarán las mediciones de sensores de presión, con el fin de obtener la información de la energía, tanto en la banda gravitatoria como en la banda infragravitatoria.

De igual forma, es importante poder contar con una recopilación de los estudios existentes en cuanto a la caracterización de las ondas infragravitatorias, y su relación con las oscilaciones de corto periodo.

Finalmente y dentro del esquema general planteado en esta Tesis, se busca que la metodología de análisis propuesta en este capítulo, sirva para proveer una técnica de selección de los elementos forzadores adecuados, que alimenten un modelo numérico avanzado de transformación de oleaje.

4.2.1 Planteamiento del problema

El oleaje, en su zona de generación, está formado generalmente por ondas de diferentes frecuencias y direcciones. En el proceso de propagación hacia la costa, los trenes de ondas con frecuencias cercanas tienen tendencia a viajar juntos. Esto da lugar a una modulación de la superficie libre con secuencias de olas grandes y olas menores que se conoce por grupos de ondas. En la Figura 4.1 se presentan tres registros de la campaña del puerto de Gijón. La línea azul representa medidas de la superficie libre del mar durante un estado de mar. La modulación en olas mayores y menores es fácilmente observable.

La variación gradual de la altura de ola en un grupo origina una variación del nivel medio. Esta depresión del nivel está, por tanto, asociada a las variaciones de la altura de ola quedando vinculada al grupo y viajando a la celeridad del mismo. Estas ondas son conocidas como ondas largas vinculadas o ligadas (*bound long waves*), tienen un periodo del orden de minutos y viajan a la celeridad del grupo que no coincide con la celeridad de las ondas individuales que componen dicho grupo.

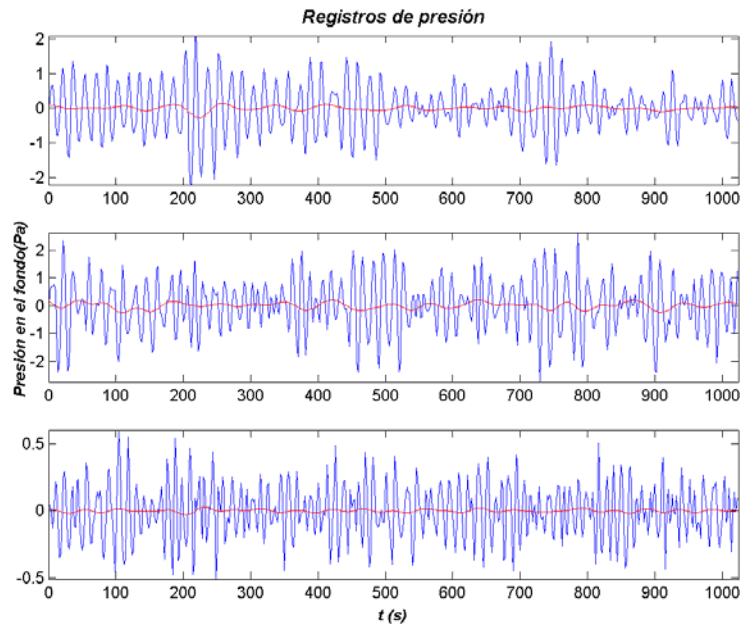


Figura 4.1. Registros de un sensor de presión (línea azul) colocado a la profundidad de 22m en la bocana del Puerto de Gijón, y su componente de onda larga (línea roja).

Debido a diversos factores como la rotura del oleaje, la difracción, o cambios bruscos en la batimetría, se puede producir la liberación de la onda ligada, originando ondas libres (*free waves*) que viajan con una celeridad de onda, \sqrt{gh} . Esta liberación de la onda larga está íntimamente relacionada con las oscilaciones de largo periodo en playas (*surf beat*) y en puertos, dado que son las principales causantes de los episodios de resonancia.

En general, las ondas infragravatorias se caracterizan por tener un periodo entre 60 segundos y 3 minutos, aproximadamente, con una altura del orden de 10^{-1} m, rara vez del orden del metro. Además, los grupos constan de 4-10 olas, con un número más probable de 6, de acuerdo a Sedivy (1978). Si bien en mar abierto las ondas largas carecen, a priori, de relevancia, estas ondas cobran importancia en zonas costeras donde su amplitud aumenta debido a la influencia del fondo y de los contornos.

Como se ha dicho anteriormente, un ejemplo de la presencia de grupos en el oleaje se observa en la figura 4.1 en la que se muestra un registro real de oleaje tomado mediante un sensor de presión situado a una profundidad de 22 m, cerca de la bocana del Puerto de Gijón. La línea continua representa los datos registrados por el sensor habiendo eliminado la marea y el nivel medio, mientras que la línea roja, muestra la componente de onda larga de dicha señal. Cada uno de los gráficos corresponde a tres estados de mar distintos. Los dos primeros, corresponden a un estado de temporal desarrollado, mientras que el inferior corresponde a un estado de oleaje no desarrollado. Se puede observar un cierto agrupamiento del oleaje como muestra la línea continua, donde existe una variación gradual de la altura de ola, conocido por modulación. Se observa además que esta modulación tiene lugar a la vez que las oscilaciones de largo periodo (línea roja).

4.3 ESTUDIOS EXISTENTES EN LA LITERATURA

Los primeros en observar la correlación existente entre las amplitudes de las oscilaciones de baja frecuencia y las olas máximas fueron Munk (1949) y Tucker (1950), con la medición de las oscilaciones de periodos del orden de 1 a 5 minutos, a las que denominaron *surf beat*.

Posteriormente Longet-Higgins & Stewart (1962), introdujeron el concepto de tensor de radiación y lo aplicaron a la propagación de grupos de olas, obteniendo que las olas mayores del grupo van acompañadas por una depresión del nivel medio del mar. Esta depresión es, por tanto, forzada por el grupo de olas que viaja, vinculada o unida, a este último (*bound long wave*).

Durante la propagación del tren de ondas agrupado desde profundidades indefinidas hasta reducidas, se puede producir la variación de las características del grupo debido a la refracción, difracción, reflexión o disipación por fondo experimentada por las olas individuales que componen el grupo. Consecuentemente, las características de la onda larga también varían. Molin (1982), demostró que la propagación de los grupos de ondas por discontinuidades en la pendiente del fondo genera ondas largas libres, que se superponen a la onda larga vinculada.

Mei & Bennousa (1984) extendieron estos resultados a grupos con incidencia oblicua y de profundidad arbitraria. Destacan además los trabajos de Liu & Iskandarini (1991) (1991) y Losada *et al.* (1993), en los que se estudian la generación de ondas largas libres en presencia de estructuras por efectos de reflexión y de transmisión.

Respecto a los trabajos que estudian la onda larga ligada destacan los trabajos de Bowers (1977) y Ottesen Hansen *et al.* (1980), que estudian la generación de onda larga ligada teóricamente, basándose en teoría potencial. Posteriormente, Sand (1982) continúa con este estudio, introduciendo la direccionalidad del oleaje. Este autor aporta unos ábacos donde expone una función bi-armónica que afecta a la solución final de la superficie libre como composición no lineal de las ondas individuales.

Para el caso de oleaje irregular, basado en una descomposición en componentes armónicas, las características de la onda larga vienen dadas en función de la diferencia del valor de los números de onda y de las frecuencias de las ondas individuales que las generan. La onda larga libre es calculada restando a un espectro real la energía obtenida por el método analítico.

Es importante señalar que el estudio de Sand (1982) se desarrolla para el caso de profundidad constante y para el caso de aguas profundas. En aguas someras, por tanto, el método no es válido ya que viola una de la hipótesis de partida de este trabajo, que supone que la amplitud de la onda larga es mucho menor que la amplitud de la onda corta.

Bowers (1992), propone una corrección con la profundidad, que consiste en añadir una componente de onda larga, desfasada 90° de la componente principal.

En concordancia con la integración de la vía potencial, Martín *et al.* (1999), realizan un ajuste para determinar funciones de transferencia oleaje-grupo en el litoral español, mediante la teoría de Ottesen Hansen *et al.* (1980), a partir del registro de oleaje de los 19 puntos de medida REMRO.

Dentro de los trabajos basados en datos de campañas de campo destaca el trabajo de Funke & Mansard (1979) donde exponen una metodología que calcula el factor de agrupamiento (*groupiness factor*) basado en el registro instantáneo de energía (SIWEH) suavizado mediante una ventana Bartlett. La técnica se basa en la obtención de una envolvente del registro de datos, a partir de la cual se determina el grado de agrupación de la serie, por un método de pasos ascendentes por cero. Esta técnica sigue una metodología paralela a la utilización de la transformada de Hilbert, para la determinación de la envolvente, pero a partir del filtrado de la señal.

Goda (1983) realiza un exhaustivo análisis comparativo entre estudios estadísticos, espectrales y el método SIWEH, de estados de mar tipo swell, medidos en la costa del Pacífico de Costa Rica. Determina que el parámetro estadístico para el estudio del agrupamiento del oleaje es el coeficiente de correlación entre las alturas de olas de corto periodo sucesivas, corroborando así el trabajo de Kimura (1980). Desde el punto de vista espectral, no encuentra relación entre la anchura espectral de Longuet-Higgins (1957) y los demás parámetros espectrales correspondientes a un oleaje tipo *swell*.

Afirma, observando la forma del espectro, que el agrupamiento aparece cuando el espectro presenta picos individuales de energía estrechos. El agrupamiento, por tanto, es consecuencia de la interacción de *wavelets* (paquetes estrechos de energía) superpuestos. Además, descarta el método SIWEH para la determinación del factor de agrupamiento debido a su poca sensibilidad para el oleaje de tipo *swell* analizado.

Posteriormente se han publicado diversos trabajos resultado del análisis de datos de campo como Vis *et al.* (1985), Nelson *et al.* (1988), Medina (1990), Okihito *et al.* (1992), Herbers *et al.* (1992), y Bowers (1992). Estos trabajos ajustan datos obtenidos en campañas de campo mediante una formulación empírica, para la determinación de la energía de onda larga (representada a través de la altura significativa de onda larga), a partir de la profundidad, la altura de ola significativa y del periodo de la onda corta. La formulación considerada es de la forma.

$$H_s^* \approx \frac{H_s^\alpha \cdot T_p^\beta}{h^\chi} \quad (4.1)$$

donde:

H_s^* : altura de ola significativa para onda larga

H_s : altura de ola significativa para onda corta

T_p : periodo de pico para onda corta

h : profundidad

En la tabla 4.1 se muestran los valores de las ternas de las constantes empleadas en el ajuste, que presentan diversos autores:

Autor	α	β	χ
Vis (1985)	2	1.2	0
Nelson (1988)	1.77	1.77	0
Medina (1990)	2	0.5	0
Bowers (1992)			
<i>Port Talbot</i>	1.32	1.17	0.34
<i>Shereham Harbour</i>	0.93	0.99	0.06
<i>Barrow-in-Furness</i>	1.08	1.59	0.36
<i>Bowers (valor final)</i>	1.11	1.25	0.25

Tabla 4.1. Ternas de coeficientes en los ajustes encontrados en la bibliografía

Todos los datos empleados en los ajustes presentados por los distintos autores corresponden a mediciones llevadas a cabo en zonas cercanas a puertos. Como se puede observar, existe una gran variabilidad entre los coeficientes de cada uno de los ajustes debido a que los valores se ven afectados por la localización en la que se tomaron las medidas, como señala Bowers (1992).

Como consecuencia principal del estado del arte revisado se observa que no existe una respuesta definitiva a la determinación de las características de onda larga. Por tanto, no se conoce una metodología para el cálculo de una función de probabilidad para la onda larga (altura de ola y periodo), que defina el clima marítimo para esta banda de frecuencias que componen el oleaje junto con las ondas cortas.

4.4 BASE DE DATOS EMPLEADA Y CAMPAÑAS DE CAMPO

La base de datos de oleaje a ser utilizada debe de cumplir con ciertas consideraciones distintas a las que se tienen a la hora de estudiar la onda corta. Estas consideraciones distintas permiten la correcta determinación de las propiedades de la onda larga. En primer lugar es imperativo el poder contar con registros de oleaje lo suficientemente largos, debido a que los periodos a analizar son mucho mayores que los correspondientes a las ondas cortas, además de que las variaciones temporales de nivel son más lentas para el caso de las ondas largas.

Los datos empleados en este estudio provienen de dos grandes campañas de campo realizadas en dos puertos situados en las costas del Mar Cantábrico, la primera frente al dique Príncipe de Asturias, que delimita la dársena del Puerto de Gijón; la segunda, en la zona exterior al Puerto de Lastres ubicado también en el litoral del Principado de Asturias.

Ambas campañas de campo se caracterizan por haber utilizado sensores de presión colocados en el fondo, siendo estos instrumentos los que mejor se adecuan a la hora de medir variaciones de nivel de largo periodo, como son las ondas infragravatorias y la marea.

Para ambas campañas se realiza una medición directa de las oscilaciones de largo periodo. Sin embargo, los sensores de presión no son capaces de registrar aquellos oleajes que por su altura de ola y por su periodo no generan señal a la profundidad a la que esté colocado el sensor.

Además de los registros de oleaje a través de la utilización de sensores de presión, se revisaron las bases de datos de oleaje pertenecientes a las boyas oceanográficas de la red REMRO, que para la zona Asturiana del Mar Cantábrico, cuenta con dos boyas escalares: la boya Gijón 1 situada en las coordenadas $43^{\circ} 34.0' N - 05^{\circ} 39.0' W$ con una profundidad de anclaje de 23 m, y Gijón 2 en las coordenadas $43^{\circ} 36.7' N - 05^{\circ} 40.0' W$ y a una profundidad de 43 m.

Estos datos no fueron tenidos en cuenta en el análisis mostrado en este capítulo, debido a que dichas boyas escalares están preparadas para registrar oleaje de corto periodo únicamente, y no cuentan con la sensibilidad necesaria para registrar las oscilaciones de largo periodo.

A continuación se presentan de forma resumida las dos campañas de campo, cuyos datos registrados se analizarán en este capítulo. La primera campaña corresponde al Puerto de Gijón, llevada a cabo por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas GIOC, de la Universidad de Cantabria, por encargo de la Autoridad Portuaria de Gijón. La segunda campaña corresponde la realizada en el al puerto de Lastres, por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX y el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria. GIOC.

4.4.1 Campaña del puerto de Gijón

La campaña del puerto de Gijón, fue diseñada inicialmente para llevar a cabo un proceso de monitorización de las medidas de presiones debido a los esfuerzos del oleaje en el espaldón del dique Príncipe de Asturias, así como de las subpresiones, antes y después de las obras de reparación del manto exterior que se llevaron a cabo en 1995.

Para la colocación de los sensores de presión se eligió una sección del tramo final del dique, cuyo calado es de 22 m, para que el oleaje incidente no estuviera limitado por la posible rotura por fondo. Se colocaron en el paramento exterior vertical del espaldón cinco sensores de presión y tres más en el fondo de éste para medir la subpresión.

La figura 4.2 muestra el croquis de localización del sensor de presión utilizado en el análisis con las coordenadas UTM para los cuatro sensores de presión.

Para relacionar las presiones medidas con el oleaje que las genera, se dispusieron cuatro medidores de oleaje frente al dique con una disposición en estrella, como muestra la figura 4.2, para poder medir las reflexiones, fases y direcciones del oleaje.

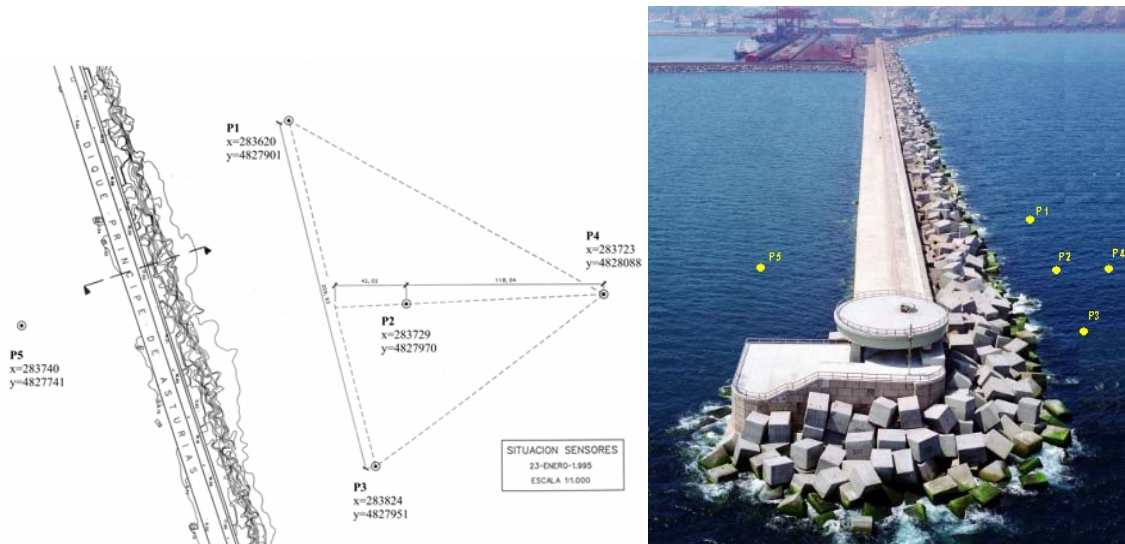


Figura 4.2. Localización del sensor de presión en el Puerto de Gijón.

El análisis mostrado en este capítulo ha sido obtenido a partir de los datos del sensor de presión de la primera campaña denominada Fase I, invierno 94-95, señalado en la figura 2 con el nombre de P4, colocado a 22 m de profundidad.

La longitud de cada burst (conjunto de datos medidos por el sensor de manera continua) fue de 512 puntos con una frecuencia de muestro de 0.5 Hz, lo que supone un total de 17 minutos 4 segundos de medida con un espaciamento entre bursts de una hora. Los burst analizados corresponden a un total de 1018, resultado de 42 días de medida, para la primera toma y de 900 estados de mar lo que supone 38 días aproximadamente, para la segunda. Las características de la frecuencia de muestreo y de la longitud de cada burst permiten tener información en la banda comprendida entre 4 y 1024 segundos.

Cabe señalar que los datos obtenidos por el sensor están afectados por la reflexión originada por el dique Príncipe de Asturias. Debido a incidencias ocurridas durante las campañas, no se dispone de tres series simultáneas de datos de medida de suficiente calidad en distintas localizaciones para obtener las series del oleaje incidente de forma fiable. Por otro lado, en el estudio de Martín *et al.* (1996), se analiza la reflexión del dique Príncipe de Asturias, obteniéndose valores de reflexión del 28%. Además, dicha estructura es bastante permeable a la onda larga, debido a que el dique está construido por bloques de 90 y 120 toneladas.

Por este motivo, se ha optado por emplear los datos tal y como están, teniendo en cuenta que los resultados están afectados por la reflexión. Además los datos pueden estar contaminados por otro hecho que es la radiación propia del puerto.

Lara *et al.* (2002), evalúan las posibles frecuencias radiadas desde el interior del puerto que alcanzan a contaminar los registros medidos, originando que los valores de la densidad de energía espectral para las frecuencias coincidentes pudiesen verse afectadas. Los autores identifican la magnitud de esta posible radiación a través de un estudio de agitación resonante aplicado a la geometría del Puerto de Gijón.

El estudio consistió en la ejecución del modelo de propagación de oleaje MSP, desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, basado en la ecuación elíptica de la pendiente suave (mild-slope equation). Obteniéndose con el modelo los coeficientes de amplificación en la posición del sensor de presión utilizado.

Los autores concluyeron en su estudio que los valores máximos del coeficiente de amplificación son relativamente pequeños ($\approx 1.3-1.6$), además de que éstos se corresponden con picos muy estrechos, cuya afección no se considera relevante para este estudio. Por otra parte se observó que para las dos bandas situadas entre 120-135 s y 220-240 s, los valores del coeficiente de amplificación son muy pequeños (≈ 0.2), y pudiera ser que se estuviera infravalorando la onda larga real en estas frecuencias. Para dichas frecuencias, el punto de medida podría considerarse un cuasi-nodo de una onda cuasi-estacionaria originada por la resonancia del propio puerto.

Cabe decir que en el análisis espectral realizado en Lara *et al.* (2002), no se observó atenuación alguna de la energía contenida en dichas frecuencias, probablemente debido a que la banda de frecuencias de resonancia es relativamente estrecha y, por tanto, la probabilidad real de acoplamiento completo de la oscilación es pequeña.

4.4.2 Campaña del puerto de Lastres

El Puerto de Lastres es dependiente de la Consejería de Obras Públicas del Principado de Asturias. Es un Puerto básicamente de uso pesquero ubicado en la costa del Mar Cantábrico, particularmente en la costa oriental del Principado de Asturias en el concejo de Colunga, al Este del Puerto de Gijón (Latitud 43° 30' N Longitud 5° 15' W).

Lastres es un puerto pequeño, formado con un dique vertical protegido con escollera en su sección inicial, de aproximadamente 250 metros de longitud y un contradique de escollera de 170 metros. El área de la dársena interior es de 30500 m² y el acceso de la bocana se ubica en la parte más al Sur del Puerto y cuenta con un ancho de 100 m. La figura 4.3. muestra una sección de la Carta Náutica que incluye al Puerto de Lastres, en donde se pueden observar la ubicación y características generales de la zona de estudio, el Bajo de La plancha, La Ensenada de Lastres y las cotas batimétricas generales.

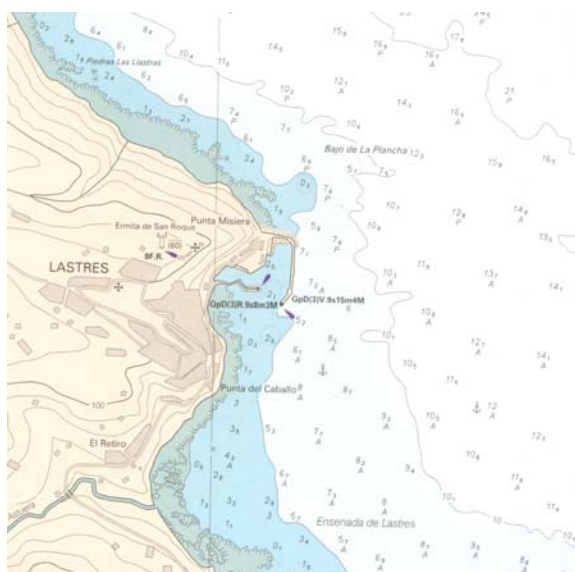


Figura 4.3. Carta náutica de la zona del Puerto de Lastres: Instituto Hidrográfico de la Marina

Se instaló una boya direccional en el borde Norte del mar abierto (punto N1), así como otra en el contorno Este (punto N2). En este último se colocó un equipo *MacroSpect*, proporcionado por la Universidad de Cantabria para poder contrastar la función de transferencia vertical. En el contorno interior, extremo Sureste, se situó un equipo sumergido S4ADW (punto W2).

Debido a que en la zona de estudio existen bajos notables, en el bajo de la Plancha, se situó un equipo justo detrás del bajo para contrastar la no linealidad y difracción con un equipo S4ADW (punto W1). En la cercanía de entrada del puerto se colocó otro equipo S4ADW (punto S1), para registrar el oleaje en aguas muy someras y la generación de la onda larga. En el interior del puerto se instalaron 3 medidores autónomos de presión, *Miniwaves*, aportados por la Universidad de Cantabria (puntos MW1, MW2, MW3). Además se colocó un mareógrafo (punto M) y una estación meteorológica (punto EM) en la baliza de entrada.

En la figura 4.4 se observa la disposición de los sistemas de medición en la zona exterior e interior del puerto.

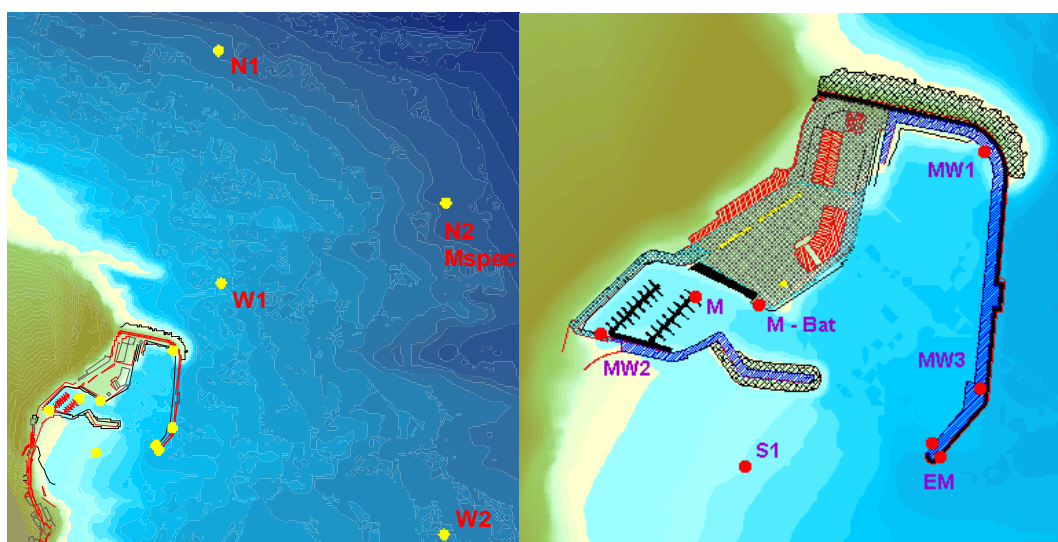


Figura 4.4 Localización de los equipos dentro y fuera del puerto de Lastres.

Las características de los equipos, posición, frecuencia de muestreo, duración de los registros y cadencia de medida se presentan en la tabla 4.2.

Para el análisis correspondiente al puerto de Lastres, se han utilizado los valores del correntímetro W2, debido a su mejor colocación con respecto a la bocana del puerto. Se despreciaron los correntímetros W1 y S1, ya que el primero de ellos podía verse afectado por la reflexión del dique de abrigo del puerto y el segundo de ellos se encontraba muy próximo a la bocana y está afectado por la radiación del puerto.

Equipo	X (UTM)	Y (UTM)	Localización	Profundidad (m)	Número total de datos	Registro cada	Δf (Hz)
<i>NI</i>	317192.1	4821598.6	Límite Norte	16	2304	30 min.	1.128031585
<i>N2 - Mspec</i>	317713.8	4821251	Límite Noreste	19	2304	30 min.	1.128031585
<i>SI</i>	316911	4820680	Entrada del Puerto	3.5	7200	180 min.	2
<i>WI</i>	317197.9	4821068.6	Atrás del Bajo	10	7200	180 min.	2
<i>W2</i>	317709.5	4820495.3	Límite Sur	14	7200	180 min.	2
<i>MWI</i>	317088.1	4820914	Dársena interior del puerto, esquina Norte	3	1800, 60	180 min., 15 min.	0.5, 1/120
<i>MW2</i>	316803.3	4820779.1	Dársena interior del puerto deportivo	1.4	1800, 60	180 min., 15 min.	0.5, 1/120
<i>MW3</i>	317049.1	4820697	Detrás del dique de abrigo principal	8	1800, 60	180 min., 15 min.	0.5, 1/120
<i>EM</i>	317054.9	4820687.3	Morro del dique	-		10 min.	continuo
<i>M</i>	316873.7	4820805.7	Límite del segundo pantalán del Puerto deportivo	2.6	-	10 min.	continuo
<i>M-BAT</i>	316920.3	4820799.9	Esquina Norte de la entrada al Puerto deportivo	4	-	10 min.	continuo

Tabla 4.2. Características generales de los sistemas utilizados en la campaña de Lastres

Una descripción detallada de la campaña de campo realizada en el puerto de Lastres, se puede revisar en Díaz *et al.* (2002), y en el informe parcial CEDEX (2002).

4.5 METODOLOGÍA

En la sección anterior se ha descrito las dos campañas de campo que proveen las series temporales de oleaje a ser analizado en este capítulo. A continuación, se enumeran los puntos generales que conforman la metodología propuesta en este estudio para la caracterización de las oscilaciones de onda larga a través de la obtención de registros de onda corta.

Se propone la siguiente metodología general para el análisis de los datos.

1. Sustracción de la componente de la marea y del nivel medio de los datos de presión obtenidos.
2. Transformación de los datos de presión obtenidos a superficie libre.
3. Obtención de los parámetros espectrales: periodo de pico (T_p), momento de orden-n (m_n), altura de ola significativa (H_s), anchura espectral de Longuet-Higgins (v^2), para cada uno de los estados de mar.
4. Ajuste de un espectro tipo JONSWAP definido a partir de la altura de ola significativa (H_s) y el periodo de pico (T_p), de los datos anteriores.
5. Elección de todos aquellos estados de mar cuyo coeficiente de correlación lineal para el ajuste anterior sea mayor de 0.97.

Del total de estados de mar medidos, se realiza una selección de los oleajes tipo swell. Posteriormente, se ajusta una fórmula empírica para la determinación de la energía total de onda larga, a partir de la altura de ola significativa y del periodo de onda corta.

6. Ajuste de los datos a una fórmula del tipo: $H_s^* = K \cdot H_s^\alpha \cdot T_p^\beta$.

Para la determinación del periodo de pico de onda larga se propone también una formulación empírica, aunque el coeficiente de correlación es inferior.

7. Análisis de correlación onda corta – onda larga con la transformada wavelet
8. Generación de las series temporales de superficie libre que alimentarán a los modelos físicos (laboratorio), o numéricos para establecer adecuadamente los posibles mecanismos de resonancia portuaria.

4.5.1 Preprocesado de la señal

El primer paso ha sido eliminar la variación de nivel correspondiente a la marea, ya que la energía contenida por la señal en altas frecuencias puede interferir en el posterior análisis de las magnitudes espectrales de energía infragravitatoria de cada uno de los estados de mar. Se han estimado diversas interpolaciones para la forma de la curva de marea en el intervalo de medida, siendo el ajuste lineal el más indicado para la longitud del burst de medida. En la figura 4.5 se representa un registro de presión obtenido por el sensor de Gijón, y un registro de dicho sensor una vez sustraída la magnitud de la marea, donde se aprecia la tendencia descendente de la curva.

Por otro lado, la variación de la marea y del nivel medio de los registros no se han tenido en cuenta en el análisis posterior debido a que el efecto del incremento de profundidad producido por ambos se ha considerado despreciable frente al calado total para las ondas infragravitatorias.

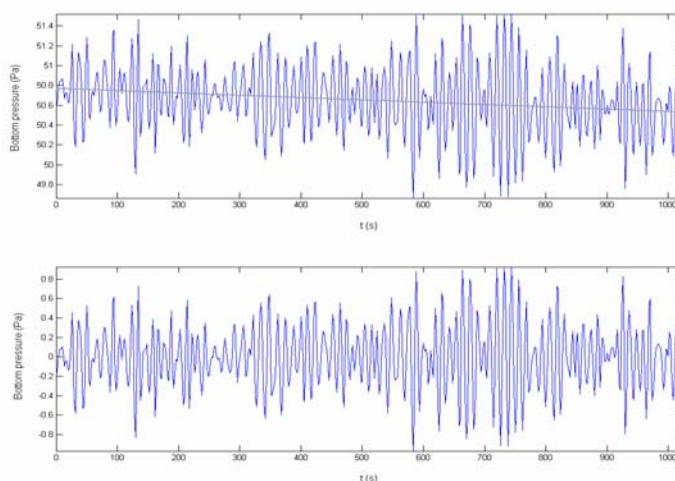


Figura 4.5. Registro de presión reflejado por el sensor (figura superior, línea azul) y magnitud de la marea (figura superior, línea gris); registro de presión resultado de sustraer la marea y el nivel medio (figura inferior, línea azul).

Previamente al tratamiento espectral llevado a cabo ha sido necesario pasar los registros de presión de oleaje a superficie libre. Para ello se ha utilizado una función de transferencia basada en la ecuación de Bernoulli, aplicada a un fluido perfecto y flujo potencial:

$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{1}{2g}(u^2 + v^2 + w^2) - \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

A partir de ella, aplicando las condiciones de contorno adecuadas y para teoría lineal se obtiene que la presión en un punto se liga con la profundidad mediante la expresión:

$$p = \eta \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad (4.3)$$

Para el caso de un tren de ondas no monocromático, la función de transferencia debe aplicarse a cada frecuencia individual, a cada una de la cuales corresponde un número de onda distinto.

Por otro lado, el sensor de presión del puerto de Gijón que se encontraba a 22 m de profundidad, no registraba bien las ondas cortas con poca altura de ola y al recomponer la superficie libre se comete un error. Esto no afecta al resultado final de este análisis ya que los datos que se escogen, como se explica posteriormente, son aquellos que tienen un periodo de pico mayor de 12 segundos y altura de ola importantes, reduciéndose, por tanto, el error en estos casos.

Para el sensor analizado en el puerto de Lastres (sensor W2) no ocurre lo anteriormente señalado, ya que se encontraba fondeado a 14 m, logrando así registrar perfectamente las ondas cortas con poca altura de ola.

Tras ello y para obtener una mayor definición de la banda de onda larga, se ha añadido al registro un paquete de ceros por delante y por detrás de cada una de las series de datos, de longitud igual al burst de medida, tanto para el sensor de Gijón como para el correspondiente a Lastres.

Se ha realizado posteriormente una corrección de la energía total para los registros medidos, a fin de que la serie conserve las mismas características de la señal de partida y para que no exista contaminación ninguna de las propiedades derivadas del análisis espectral.

Con esta técnica se busca contar con una mayor resolución para la localización del periodo de pico en la banda de onda larga. Al espectro obtenido se le ha aplicado un suavizado con la técnica de media móvil con una anchura de ventana de quince puntos, conservando el valor total de la energía del espectro. En la figura 4.6 se muestra la diferencia de definición en la banda de energía infragravitatoria tras la introducción de ceros en el registro. Se puede observar como, al aumentar el número de puntos en la transformada de Fourier, la definición de la zona aumenta y la localización de los picos es más precisa.

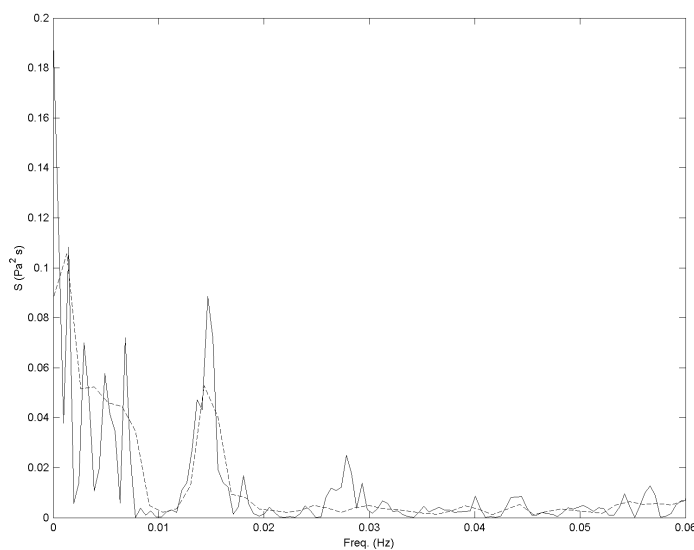


Figura 4.6. Espectro de energía del burst 101120221 W2 de Lastres, en la banda de energía infragravitatoria, con introducción de ceros en la señal (línea continua) y sin dicha introducción (línea discontinua).

Se puede obtener por tanto, los siguientes parámetros espectrales para las bandas de energía asociadas a las ondas infragravitatorias (60-400 segundos) y energía asociada a las ondas de gravedad (5-30 segundos):

a) Periodo de pico (T_p): periodo asociado al máximo valor de densidad espectral.

b) Momento de orden-n (m_n): $m_n = \int_0^{\infty} f^n \cdot S(f) \cdot df$; $n = 0, 1, 2, \dots$

c) Altura de ola significativa (H_s): $H_s = 4.004 \cdot \eta_{rms} = 4.004 \cdot \sqrt{m_0}$

d) Anchura espectral de Longuet-Higgins (1957): $\nu^2 = \frac{m_0 \cdot m_2}{m_1^2} - 1$

4.5.2 Selección de los estados de mar

El objetivo de la selección es identificar entre todos los estados de mar medidos aquellos que correspondan a un mar de fondo (tipo *swell*), para los cuales el agrupamiento esperado del oleaje es mayor y que, por tanto, incluya una mayor cantidad de energía contenida en la banda de frecuencia infragravitatoria. Para ello se realiza un ajuste de los espectros medidos a un espectro JONSWAP.

Se utiliza la aproximación de Goda (1983), cuya ventaja radica en que la densidad de energía espectral ($S(f)$) aparece en términos de la altura de ola significativa (H_s) y el periodo de pico (T_p), tal y como se muestra a continuación:

$$S(f) = C \cdot H_s^2 \cdot T_p^{-4} \cdot f^{-5} \cdot e^{-1.25(T_p \cdot f)^4} \cdot \gamma e^{\frac{-(T_p \cdot f - 1)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.4)$$

donde,

$$C \cong \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336 \cdot \gamma - 0.185 \cdot (1.9 + \gamma)^{-1}}$$

$$\sigma \Rightarrow \begin{cases} \sigma_a \cong 0.07; f < f_p \\ \sigma_b \cong 0.09; f > f_p \end{cases}$$

γ : parámetro de apuntamiento (normalmente entre 1 y 7).

El factor de apuntamiento γ ha sido utilizado como parámetro libre para ajustar la forma del espectro JONSWAP de igual periodo de pico (T_p), y de igual energía (m_0), que los espectros medidos, previamente suavizados.

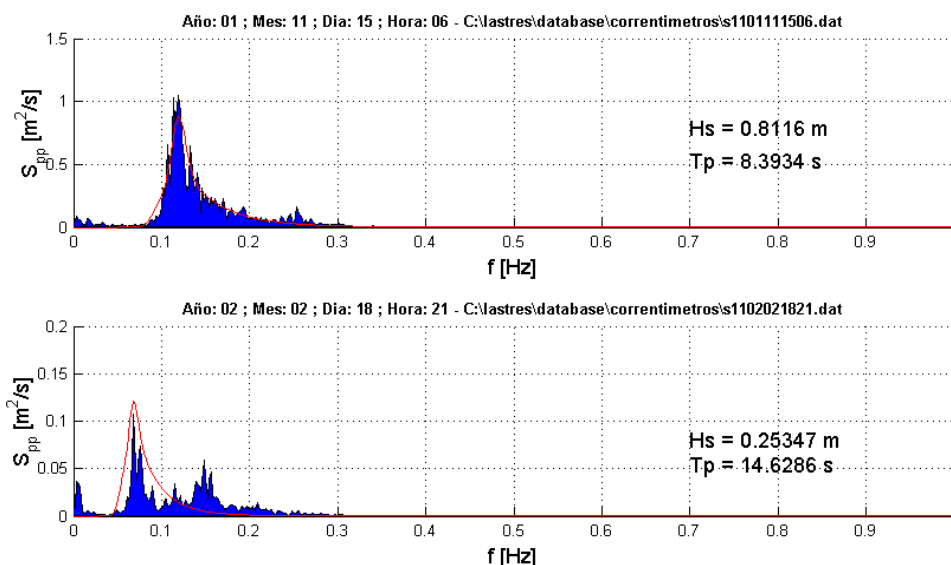


Figura 4.7. Espectro medido (azul) y el espectro JONSWAP ajustado (línea roja), para un oleaje tipo swell (figura superior) y uno compuesto por dos oleajes.

Los estados de mar tipo *swell* se identifican con un coeficiente de correlación lineal alto en el ajuste al espectro JONSWAP. Quedan, por tanto, despreciados para el posterior análisis todos aquellos estados de mar tipo *sea* y los compuestos de *sea* y *swell*, identificados con valores bajos del coeficiente de correlación lineal.

En la figura 4.7 se muestra un ajuste realizado a dos estados de mar, el superior correspondiente a un oleaje tipo *swell* con un ajuste que alcanza un coeficiente de correlación del 98%, y el inferior correspondiente a un oleaje tipo compuesto que únicamente cuenta con un coeficiente de correlación del 62%. Se observa, como la forma del espectro JONSWAP se ajusta mejor al primer caso, situación óptima para la que fue concebido, que al segundo.

Se escogen por tanto para el análisis posterior 79 series para el sensor de presión de Gijón y 107 series para el sensor W2 de la campaña de Lastres, cuyo ajuste con un espectro JONSWAP posee un coeficiente de correlación superior al 97%.

4.5.3 Ajuste empírico

El tercer punto dentro de la metodología consiste en realizar un ajuste empírico a partir de los parámetros espectrales obtenidos del ajuste a un espectro JONSWAP de los datos medidos, para los dos sensores de los dos puertos.

Para ello se estudió la posible correlación de los diversos parámetros espectrales, encontrando únicamente una buena correlación entre los parámetros altura de ola significativa (H_s), y periodo de pico (T_p), con la energía de la banda infragravitatoria. La forma de la función empírica a ajustar fue la empleada por Bowers (1992), sin tener en cuenta el efecto de la profundidad:

$$H_s^* = K \cdot H_s^\alpha \cdot T_p^\beta \quad (4.5)$$

donde:

K : parámetro de ajuste

H_s^* : altura de ola significativa para onda larga

H_s : altura de ola significativa para onda corta

T_p : periodo de pico para onda corta

α : parámetro empírico

β : parámetro empírico

Los resultados del ajuste se presentan en dos partes, la primera corresponde a los ajustes realizados para el parámetro de altura significativa de onda larga, y la segunda parte presenta los resultados correspondientes al periodo de pico de onda larga.

a) Resultados para la altura de onda larga

La altura de ola para la energía infragravitatoria se define en este trabajo, por analogía con la onda corta, como:

$$H_s^* = 4\sqrt{m_0^*} \quad \text{donde } m_0^* = \int_{1/400}^{1/50} S(f)df \quad (4.6)$$

Donde S(f) es la densidad de energía espectral de las mediciones.

Este parámetro está relacionado con la energía del espectro medido en la banda 60-400 segundos. Se han escogido estos intervalos de 50-400 segundos debido a que la energía en las frecuencias inferiores a 50 s y en las superiores a 400 s era del orden del ruido numérico introducido por el método espectral utilizado. En las figuras 4.8 y 4.9, se exponen los registros temporales de altura de ola significativa (H_s), periodo de pico (T_p) asociados a ondas cortas y largas, así como el coeficiente de correlación en el ajuste al espectro JONSWAP, para el sensor de presión del puerto de Gijón y el sensor del puerto de Lastres respectivamente.

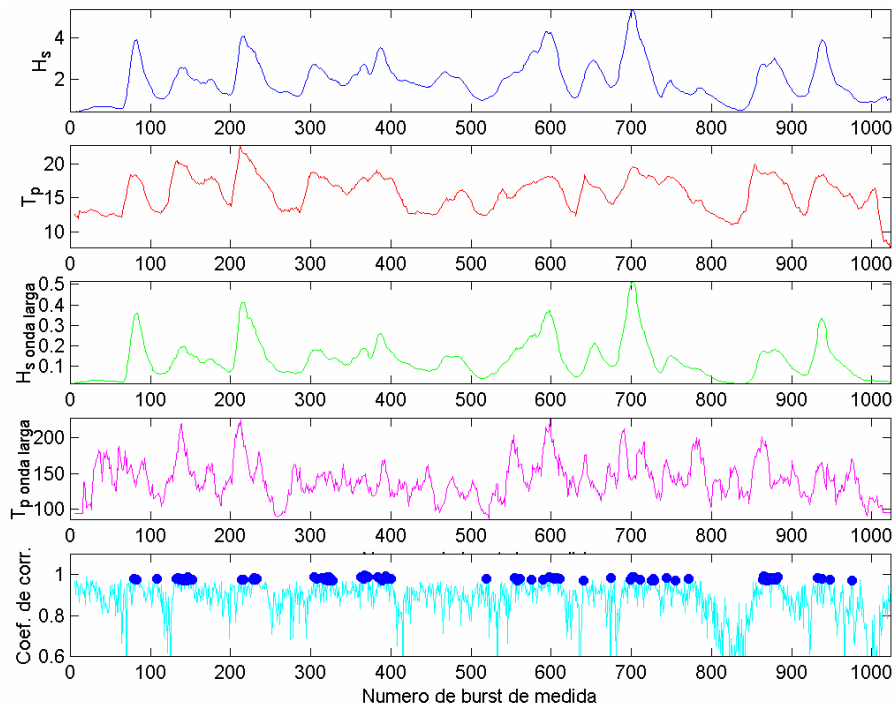


Figura 4.8. Sensor de Gijón. Historia de la evolución de la altura significativa de ola (H_s) (primera gráfica), periodo de pico (T_p) (segunda gráfica) para onda corta, altura significativa de ola (H_s^*) (tercera gráfica), periodo de pico (T_p) (cuarta gráfica) para onda larga, coeficiente de correlación en el ajuste con un espectro JONSWAP (figura inferior, línea) y burst con coeficiente de correlación >0.97 (figura inferior, puntos).

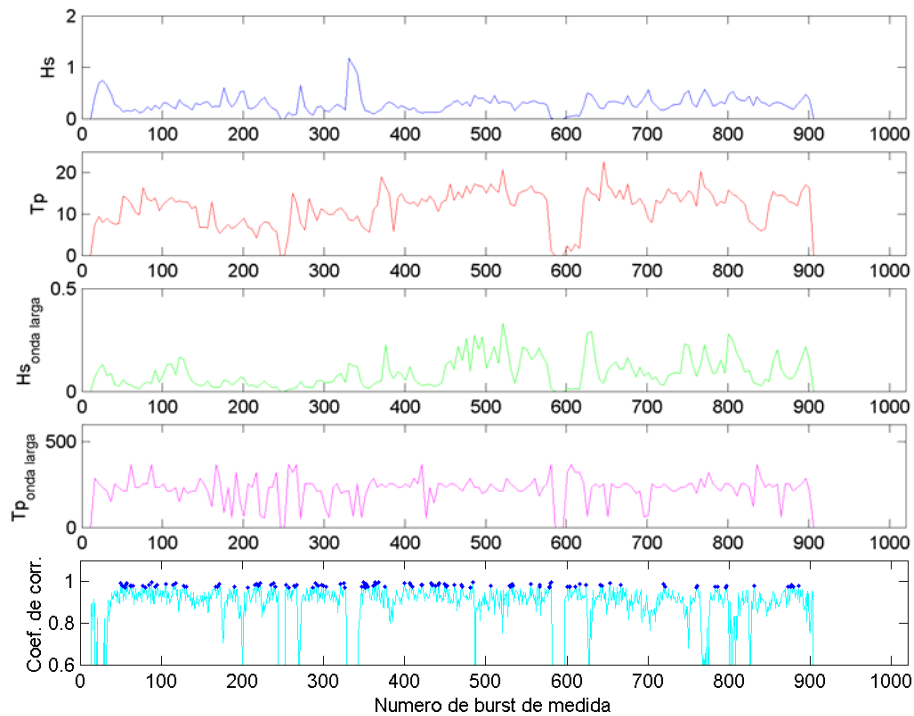


Figura 4.9. Sensor de Lastres. Historia de la evolución de la altura significativa de ola (H_s) (primera gráfica), periodo de pico (T_p) (segunda gráfica) para onda corta, altura significativa de ola (H_s^*) (tercera gráfica), periodo de pico (T_p) (cuarta gráfica) para onda larga, coeficiente de correlación en el ajuste con un espectro JONSWAP (figura inferior, línea) y burst con coeficiente de correlación >0.97 (figura inferior, puntos).

Se ha realizado un suavizado del registro histórico de los parámetros mediante una media móvil con una anchura de ventana de 5 burst, con el fin de eliminar posibles efectos de falta de resolución espectral, muy sensible sobre todo al periodo de pico de la banda de energía infragravitatoria.

Observando los dos primeros gráficos de la figura 4.8, correspondientes a altura de ola significativa y periodo de pico para onda corta para el puerto de Gijón, se aprecia la existencia de picos en el mismo burst de medida (alrededor del burst 220, 600 y 700) correspondientes a temporales. Otro aspecto a señalar es el comportamiento paralelo entre las energías gravitatoria e infragravitatoria, existiendo una correlación muy alta entre dichos parámetros, tal y como se ha demostrado ampliamente en la bibliografía, y como se comprueba en los análisis que se muestran en este apartado. La gráfica correspondiente al periodo de pico de onda larga (figura 4.8, cuarto gráfico) muestra una forma con picos a lo largo de los burst de medida, debido a la poca estabilidad de este parámetro por la falta de definición de puntos en esta zona del espectro.

Si se observa la figura 4.9, correspondiente a las mediciones realizadas en Lastres, se identifica la existencia de un temporal importante (cerca del burst 350), el cual se alcanza a visualizar en el registro de altura significativa de onda larga. Se observa que cuando aumenta la altura de ola significativa para onda corta aproximadamente a partir del burst 400, es evidente un incremento en los valores correspondientes a periodo pico de onda corta, que a su vez afectan directamente a los valores de altura de ola significativa de onda larga, presentando picos energéticos aislados. El periodo de pico de onda larga para el puerto de Lastres se mantiene oscilando cerca del valor $T_p=512s$, y $T_p=250s$ para la parte más energética del registro.

Como se describe en la metodología desarrollada en la sección anterior, solamente se consideran en el análisis aquellos estados de mar correspondientes a un coeficiente de correlación superior al 97%, que corresponden a oleajes tipo *swell*, donde es esperable que la energía en las frecuencias infragravitatorias sea más apreciable. En la parte inferior de los gráficos 4.8 y 4.9 se observa la evolución del coeficiente de correlación lineal en el ajuste al espectro JONSWAP en los burst de medida, apareciendo superpuestos en la curva con puntos aquellos valores que cumplen dicha correlación.

Por otro lado, se puede apreciar una correspondencia perfecta con los máximos de alturas de ola significativa tanto para energía gravitatoria como infragravitatoria. Por tanto, el método elegido para la separación parece adecuado para la identificación de los oleajes tipo *swell*.

Con la obtención de los datos que cumplen las mayores correlaciones, se procede a la aplicación directa del ajuste basado en el estado del arte que correlaciona la altura de ola significativa de onda larga con los parámetros del oleaje de onda corta de la forma.

$$H_s^* = K \cdot H_s^\alpha \cdot T_p^\beta \cdot \gamma^\delta \cdot \nu^\epsilon \quad (4.7)$$

Se ha observado poca incidencia de los parámetros γ y v^2 , tal y como se ha comentado anteriormente, por lo se ha adoptado por una formulación similar a la utilizada por Bowers (1992), pero sin tener en cuenta la profundidad, ya que todas las medidas se tomaron a la misma profundidad y partiendo del hecho de que el efecto de la marea se considera despreciable.

Esto significa que la anchura espectral no está relacionada con la relación H_s/H_s^* , para oleajes tipo swell. Escogiendo, por tanto, aquellos puntos que superen un coeficiente de correlación lineal superior a 0.97 en el ajuste a un espectro JONSWAP, y para el ajuste simplificado, se obtiene:

$$H_s^* = 0.0068 \cdot H_s^{1.402} \cdot T_p^{0.66} \quad \text{para Gijón} \quad (4.8)$$

$$H_s^* = 0.0070 \cdot H_s^{1.36} \cdot T_p^{0.81} \quad \text{para Lastres} \quad (4.9)$$

Se puede apreciar como el ajuste obtenido concuerda bastante bien con el obtenido por Bowers (1992) para *Port Talbot*, mostrado anteriormente.

Las mayores similitudes aparecen en el valor de la constante K y del exponente de la altura de ola. En el caso de la constante se ha obtenido el valor de 0.0068 para Gijón y de 0.0070 para Lastres, frente a 0.0064 obtenido por Bowers (1992).

Este obtuvo un valor del exponente de 1.32, frente a 1.402 para Gijón y 1.36 para Lastres propuestos en este análisis. La discrepancia entre los exponentes del periodo de pico (0.666 de Gijón, de 0.81 para Lastres, y 1.17 para Bowers, 1992), puede ser debida al hecho de no incluir la profundidad en el ajuste. Éste propuso un valor de 0.34 en el exponente de la profundidad. El orden de magnitud de la profundidades de 22 m y 14 m, para Gijón y Lastres, respectivamente en el ajuste realizado. Los valores del periodo de pico en los estados de mar seleccionados, entre 16 y 22 s para Gijón y 19 y 15 s para Lastres, es el mismo y el hecho de considerar únicamente puntos a una misma profundidad hace que el factor profundidad aparezca como una constante que afecta a todos los valores.

En la figura 4.10 se muestra el valor medido de H_s para ondas infragravitatorias y la estimación mediante el ajuste para los datos medidos con el sensor del puerto de Gijón. Los valores utilizados en el ajuste con coeficiente de correlación $>97\%$, se representan en puntos rojos, y todos los valores medidos con puntos azules.

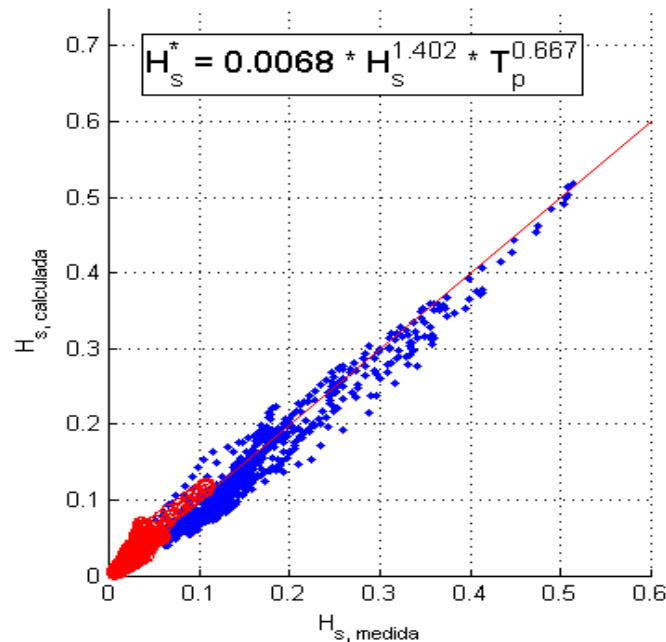


Figura 4.10. Resultado del ajuste para los datos analizados en el Puerto de Gijón. Valores utilizados en el ajuste con coeficiente de correlación $>97\%$, (puntos rojos). Todos los valores medidos, (Puntos azules).

El coeficiente de correlación lineal para dicho caso es de 0.98, considerando únicamente los puntos del ajuste y de 0.95, para todos los puntos, figura 4.10. Es, por tanto, una buena predicción, incluso en el caso de considerar estados de mar que no se consideran *swell*.

En la figura 4.11 se muestra el gráfico correspondiente a resultados del ajuste para los datos del sensor M2 medidos en la campaña de Lastres, representando el valor medido de H_s para ondas infragravitatorias y la estimación mediante el ajuste para los datos medidos.

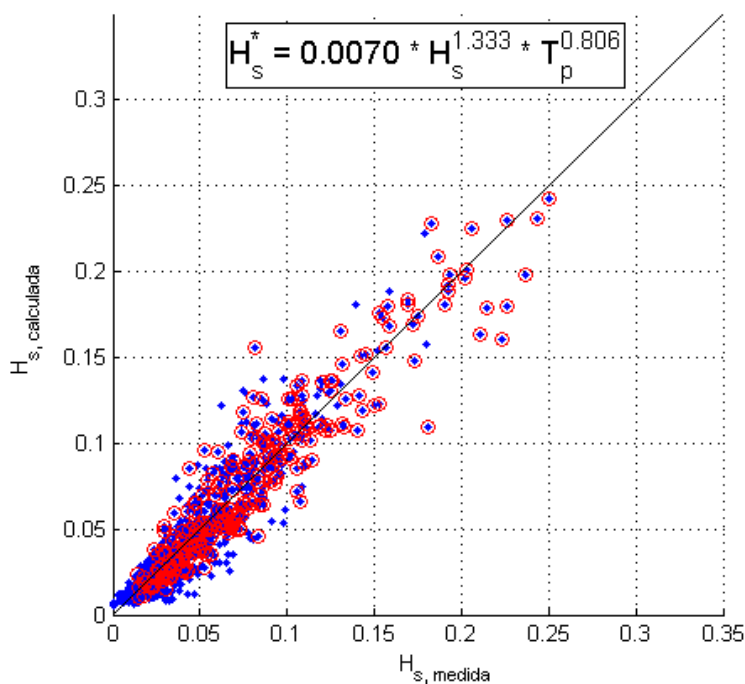


Figura 4.11. Resultado del ajuste para los datos analizados en el Puerto de Lastres. Valores utilizados en el ajuste con coeficiente de correlación >97%, (puntos rojos). Todos los valores medidos, (Puntos azules).

El ajuste mostrado en la figura 4.11 para los estados de mar más energéticos de los registros de comprobación es bueno, con un coeficiente de ajuste superior al 95%, aunque como se aprecia en la figura, la altura de ola es inferior en los datos iniciales debido a la ausencia de temporales en el periodo que duró la toma de datos.

b) Resultados para el periodo pico de onda larga

Para definir el periodo de pico se ha seguido el mismo criterio empleado por Bowers (1992), aunque existen otras definiciones también válidas. El periodo de pico de onda larga se define como el correspondiente a la frecuencia donde la curva de densidad de energía espectral toma el valor máximo, en el rango 60 s a 400 s.

Mediante la observación de todos los espectros en la banda de energía infragravitatoria para las mediciones en Gijón, se aprecia que los casos de temporal ($H_s > 3$ m), la máxima energía en onda larga se localiza siempre en la banda correspondiente a 130-200 segundos. Por otro lado, aparece un paquete de energía, que no está asociado siempre a

la presencia de temporales en la banda de 75-90 segundos. Aparece en ciertos estados de mar y su persistencia es inferior a la duración de éste.

Para el ajuste del periodo de pico de onda larga, se procedió de manera análoga al caso anterior con la altura de la onda larga. La función de partida fue la siguiente:

$$T_p^* = K \cdot H_S^\alpha \cdot T_p^\beta \cdot \gamma^\delta \cdot \nu^\epsilon \quad (4.10)$$

Como se aprecia la función es del mismo tipo que en el ajuste anterior. Los resultados obtenidos muestran correlaciones pobres con todos los parámetros espectrales excepto con el periodo de pico de onda corta, motivo por el cual, la función propuesta es:

$$T_p^* = 8.03 \cdot T_p \quad (4.11)$$

Mostrando un rango de valores posibles de la constante K entre 7 y 10.

El ajuste revela que la posición más probable del máximo de energía de onda larga se localiza en un periodo ocho veces mayor (valor medio de los datos analizados) que el periodo asociado a onda corta, como se ve en la figura 4.12, que muestra el ajuste de periodo pico de onda larga para el puerto de Gijón.

Por tanto, según los ajustes realizados para el puerto de Gijón, el parámetro que más influye en la localización de la energía en la banda infragravitatoria es el periodo de pico asociado a la onda corta. Esto viene a corroborar las intuiciones de Goda (1983), que afirmaba que los espectros más energéticos desde el punto de vista de onda larga eran aquellos que mostraban picos muy agudos en la función de densidad espectral en la banda de onda corta, y que interactuaban entre ellos como paquetes *wavelets*, para la generación de la onda larga.

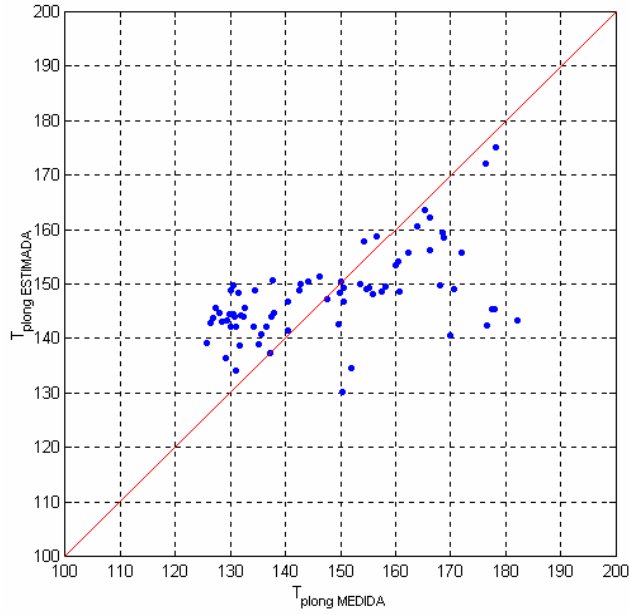


Figura 4.12 Resultado del ajuste para los datos utilizados en el ajuste (>97%), para los datos de periodo pico de onda larga medidos en el puerto de Gijón.

Respecto al ajuste del periodo de pico en la banda infragravitatoria que se muestra en la figura 4.13, se observa como el resultado del ajuste tiene un coeficiente de correlación inferior al obtenido en el caso de la altura de ola significativa de onda larga. Se observa como el cociente T_p^*/T_p oscila entre 7 y 11, segundos. Se tomó como valor de mejor ajuste $T_p^* = 8.03 \cdot T_p$ para el caso del puerto de Gijón.

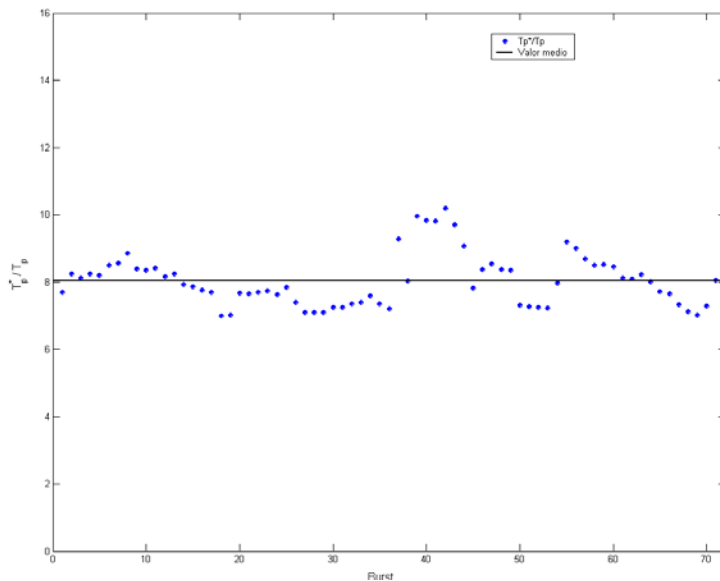


Figura 4.13 Evolución de la relación T_p^* (onda larga) / T_p (onda corta), a lo largo de los burst utilizados para el análisis para el Puerto de Gijón.

En el caso de Gijón este ajuste es aplicable a este tipo de espectros que señala Goda (1982): los tipo swell, para los que el ajuste anteriormente presentado muestra valores de correlación entre periodo de pico simulado y medido, altos.

Para el caso de Lastres, en los que la energía de onda corta no se encuentra en una frecuencia tan preponderante, la correlación es inferior a la mostrada para el puerto de Gijón, debido a la gran dispersión observada en la determinación del máximo de energía en la banda infragravitatoria.

Debido a lo señalado anteriormente para el análisis de los datos medidos en Lastres, se ha optado por un análisis alternativo de temporales individuales, condición aplicable a dichas series de datos debido a que al ser la duración de éstos mayor (1 h, frente a 18 minutos para el caso de Gijón), aumenta el número de ondas largas incluidas en el análisis. Con esto se intenta obtener una mayor estabilidad a la hora de calcular los espectros.

En la figura 4.14 se muestra el temporal ocurrido los días 28 y 29 de noviembre de 2001. Se han representado 8 *bursts* consecutivos de medida de presión en el correntímetro W2, que se encuentran separados entre si 3 h.

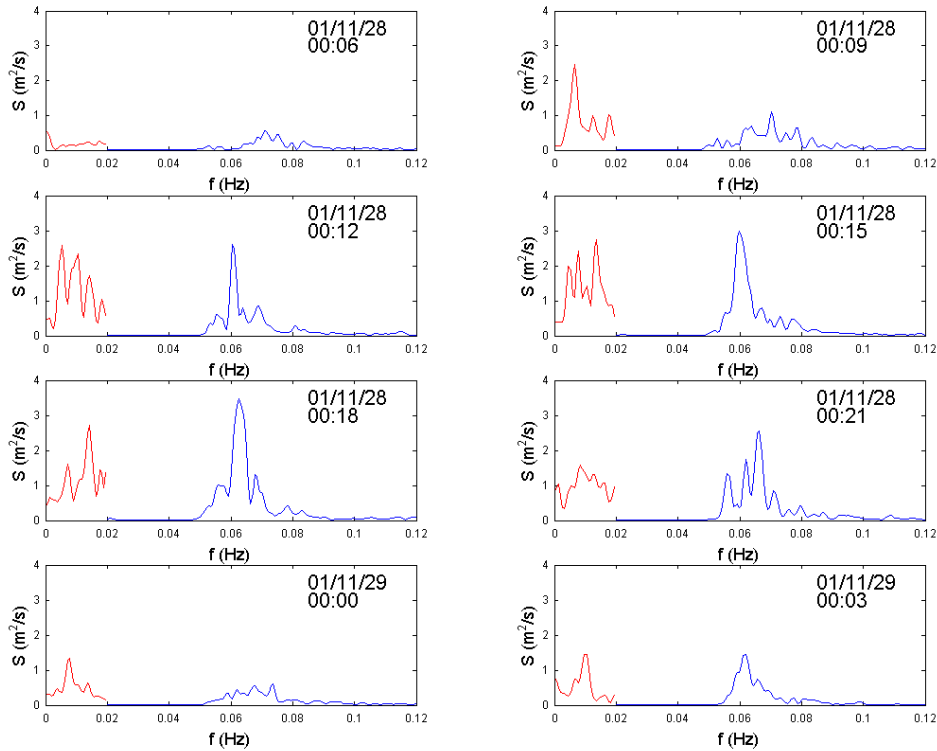


Figura 4.14 Densidad de energía espectral para *burst* de medida consecutivos, correspondientes a un temporal de la campaña de Lastres, para las bandas gravitatoria (azul) e infragravitatoria (escalados x50) (rojo).

En azul se representa la densidad de energía espectral para la banda gravitatoria, y en rojo para la banda infragravitatoria (valores escalados x 50). Los registros correspondientes a los instantes más intensos del temporal corresponden a las horas 12, 15 y 18 del día 28. Para esos registros, los estadísticos de altura de ola significativa y de periodo de pico permanecen constantes, y la forma del espectro es muy similar en todos ellos. Sin embargo, los espectros de la banda correspondiente a la onda larga son distintos en cada uno de los *bursts* representados, apareciendo paquetes energéticos situados en diferentes frecuencias para cada uno de ellos. Además, el máximo de energía de onda larga está situado en una posición diferente para cada 3 horas de medida aunque el espectro de onda corta es similar.

Por tanto, se observa que mientras los estadísticos de onda corta permanecen constantes, como ocurre en un estado de mar, los estadísticos correspondiente a la onda larga varían. Además la forma de los espectros no sigue un patrón común, como en el caso de la onda corta. Se pone de manifiesto que el espectro de onda larga no es estacionario, aunque se mantengan estacionarias las condiciones de onda corta.

Como señalan Lara *et al.* (2002), una de las razones posibles de este hecho puede ser la corta duración de los registros que se utilizan para el estudio de la onda larga, de aproximadamente 18 min para el puerto de Gijón.

Estos registros de medida son aptos para onda corta pero son demasiado cortos para la onda larga. De igual forma sucede para el caso de la campaña de Lastres con registros analizados de 1h de duración, y donde se observa la misma tendencia. Además la no estacionariedad del espectro de onda corta provoca que se vulnere una de las hipótesis del análisis tradicional de Fourier, que considera que los estadísticos de las señales son estacionarios. Este hecho hace que el análisis de la banda infragravitatoria mediante la técnica de la transformada de Fourier no sea del todo adecuada.

Por esto, se propone el uso de la transformada wavelet que se ha venido aplicando en los últimos años en la ingeniería en diversos campos (Liu, 2000). Esta técnica permite la ubicación en el espacio y en el tiempo de la energía, lo que permite estudiar la migración en el tiempo de ésta, y de unas frecuencias a otras.

4.5.4 Aplicación de la transformada wavelet

La técnica que tradicionalmente se ha venido utilizando para la determinación de las frecuencias principales de un registro temporal, es el análisis de Fourier. Con esta técnica, se obtienen los parámetros que definen el comportamiento medio de la señal analizada, partiendo de la hipótesis de recomposición lineal de dicha señal, a través de una suma de funciones sinusoidales con diferentes frecuencias.

La segunda hipótesis que asume la utilización del análisis de Fourier es asumir que los estadísticos de los registros permanecen constantes a lo largo de su duración, es decir que son periódicos y estacionarios en el tiempo.

La onda larga caracterizada a través de registros de series de presión medidas en campo presentada en apartados anteriores, ha mostrado características no estacionarias aún cuando la energía de onda corta existente en el registro cumpla con las hipótesis del análisis de Fourier, por lo que la obtención del comportamiento medio de las

oscilaciones de onda larga dentro de la metodología de caracterización, se ve limitada por el uso de una técnica de análisis estacionaria y media, además de que pierde valiosa información sobre los paquetes energéticos de onda larga que aparecen intermitentemente a lo largo de los registros temporales.

Si presuponemos que la energía de onda larga existente en los registros temporales obtenidos en campo no mantienen ni la estacionalidad ni la periodicidad, la técnica wavelet es la indicada para la adecuada visualización y análisis de las propiedades energéticas de dichas oscilaciones de bajo periodo, permitiendo la localización en el tiempo de los paquetes energéticos de onda larga y su posible correlación con el comportamiento de la energía de onda corta no solo con los valores medios como lo expuesto en apartados anteriores, si no ampliando el estudio hacia la dimensión temporal.

La técnica wavelet fue originalmente desarrollada por Morlet *et al.* (1982), quienes propusieron herramientas novedosas para el análisis de series temporales en las dimensiones tiempo-frecuencia-energía. Una descripción más detallada de la técnica wavelet se puede encontrar en Grossman & Morlet (1984); Daubechies (1992); Torrence & Compo (1998); y Mallat (1999).

A continuación se presentan brevemente los aspectos teóricos más relevantes de la transformada wavelet.

La transformada de Fourier de una señal cualquiera $X(t)$ se expresa como sigue.

$$\hat{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4.12)$$

Donde la señal $X(t)$ se reconstruye con las series de senos y cosenos con frecuencia ω . Para analizar simultáneamente el comportamiento de la señal en el dominio de tiempo y de frecuencia, se realiza una convolución de la ecuación (4.12) con una función $g(t)$, basada en la integral de escala temporal (Hinze (1969); Tennekes & Lumley (1972)), quedando.

$$\hat{X}(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) g(t - \tau) e^{-i\omega t} dt \quad (4.13)$$

La ecuación (4.13) se conoce como la transformada de corto intervalo de Fourier (*short-time Fourier transform*), y se puede discretizar en el tiempo τ y en la frecuencia ω , quedando en $a\tau_0$ y $b\omega_0$ respectivamente, llegándose a la siguiente ecuación.

$$\hat{X}(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) g(t - a\tau_0) e^{-ib\omega_0 t} dt \quad (4.14)$$

El parámetro a controla la magnitud de la función, y el parámetro b la posición de la ventana.

La función que relaciona los parámetros a , b y t , $g(t - a\tau_0) e^{-ib\omega_0 t}$ se puede sustituir por la familia de funciones denominadas wavelets.

$$\psi_{a,b} = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.15)$$

Quedando la siguiente ecuación general que define la familia de funciones $\psi_{a,b}$ que se obtienen mediante el escalado del parámetro a y el desplazamiento de la función en la serie mediante el parámetro b de la función base ψ denominada función madre.

$$\hat{X}(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) |a|^{-1/2} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4.16)$$

donde el asterisco significa el conjugado complejo de la función madre. Esta función debe cumplir con la condición de admisibilidad (4.17), y la función de continuidad y diferenciabilidad (4.18) expresadas como:

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4.17)$$

$$\hat{\psi}(t) \Big|_{\omega=0} = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (4.18)$$

Con esto, la señal $X(t)$ se puede calcular a partir de la función madre $\psi_{a,b}$ y la transformada wavelet $\tilde{X}(a,b)$ mediante la doble integral siguiente.

$$X(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{X}(a,b) \psi(t) \frac{dad b}{a^2} \quad (4.19)$$

Análogamente a la técnica de la transformada de Fourier, se obtiene la energía total de la señal con la relación:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)^2 dt = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{X}(s,\tau) \tilde{X}^*(s,\tau) ds d\tau \quad (4.20)$$

y el espectro wavelet con:

$$W_X(s,\tau) = \frac{1}{C_{\psi}} |\tilde{X}(s,\tau)|^2 \quad (4.21)$$

El espectro de Fourier es equivalente al promedio del espectro wavelet en el periodo de observación.

El espectro wavelet expresa el grado de correlación que existe entre la señal y la forma de la función madre, por lo que una adecuada elección de la función madre, condiciona la calidad de los resultados de la transformada wavelet. Existe un gran número de familias para la función madre, con diferentes formas y características.

La función madre tipo Morlet debido a sus características de forma y a su naturaleza compleja ha presentado un buen comportamiento a la hora de trabajar con registros temporales de oleaje Liu (2000), Lara *et al.* (2002), definiéndose como una función sinusoidal por una función Gaussiana mostrada en la figura 4.15 y expresándose como sigue.

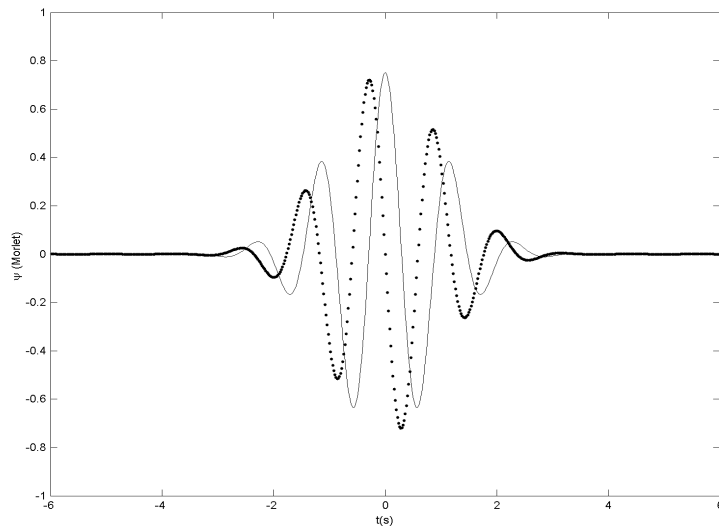
$$\psi_0 = \pi^{-1/4} \left(e^{-imt} - e^{-m^2/2} \right) e^{-t^2/2} \quad (4.22)$$

Con la correspondiente transformada de Fourier.

$$\hat{\psi}(\omega) = \pi^{-1/4} \left(e^{-(\omega-m)^2/2} - e^{-(m^2+\omega^2)/2} \right) \quad (4.23)$$

donde $m = \pi\sqrt{2/\ln 2}$ es la frecuencia básica ω_0 .

La figura 4.15 muestra la función madre que es simétrica para su componente real y asimétrica para la componente imaginaria. Las amplitudes crecientes y decrecientes de la función se adecuan eficazmente a los movimientos oscilatorios del flujo a analizar.



*Figura 4.15 Función madre tipo Morlet.
Parte real (línea continua), parte imaginaria (puntos)*

De la transformada wavelet se obtiene la información de los paquetes energéticos de onda larga existentes en los registros temporales medidos en campo, para la evaluación de su magnitud, frecuencia y ocurrencia temporal. El espectro wavelet se calcula a partir del módulo de la transformada compleja, relacionando su valor con el espectro de energía.

En la figuras 4.16 a 4.19 se exponen los registros de presión correspondientes a la banda gravitatoria (panel superior) y a la banda infragravitatoria (tercer panel), y sus correspondientes espectros wavelet (paneles segundo y cuarto, respectivamente) para las mediciones de presión realizadas con el correntímetro W2 de Lastres para las fechas 28/11/01 a 29/11/01 cada 3 horas, partiendo de las 18:00 horas del día 28.

En los paneles segundo y cuarto se han representado, mediante una línea blanca los máximos de energía. Se observa para las cuatro figuras cómo para el espectro wavelet de onda corta (segundo panel) se identifica correctamente el agrupamiento de la señal y como la energía está concentrada en toda la duración del registro alrededor del periodo de pico que es de 15.8 s. Sin embargo, en el espectro wavelet de la banda infragravitatoria (cuarto panel) se aprecia como aparecen paquetes de energía concentrados principalmente alrededor de 50, 150 y 250 s, y como la línea de máxima energía oscila entre estos valores.

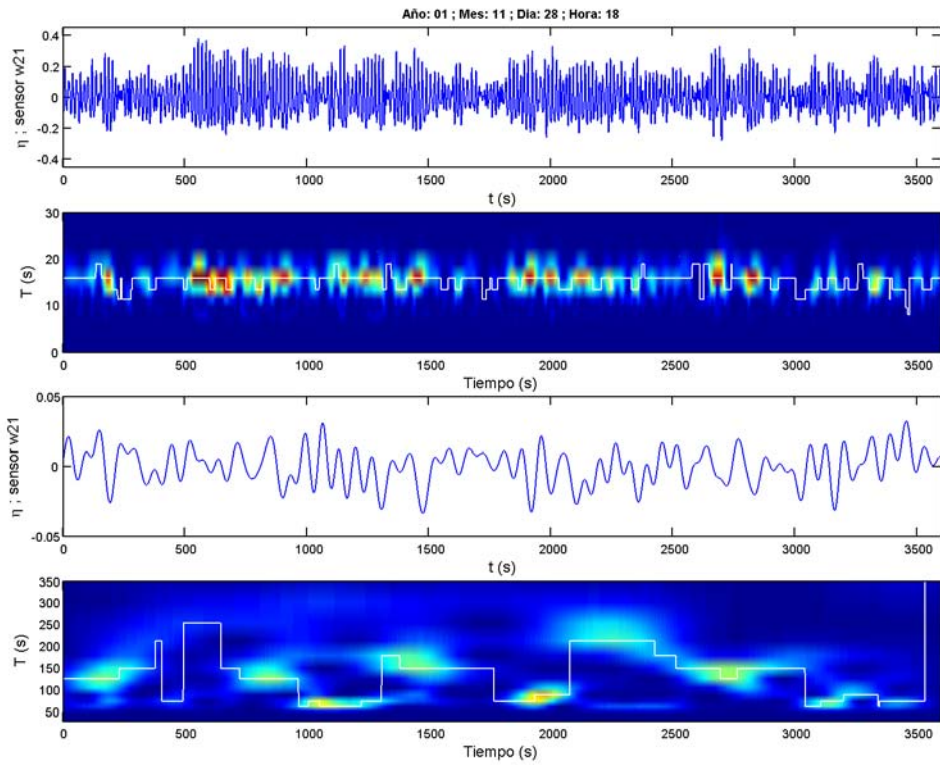


Figura 4.16 Registros de presión correspondientes a la banda gravitatoria (panel superior) y a la banda infragravitatoria (tercer panel), y sus correspondientes espectros wavelet. Fecha 28/11/01 18:00 hrs.

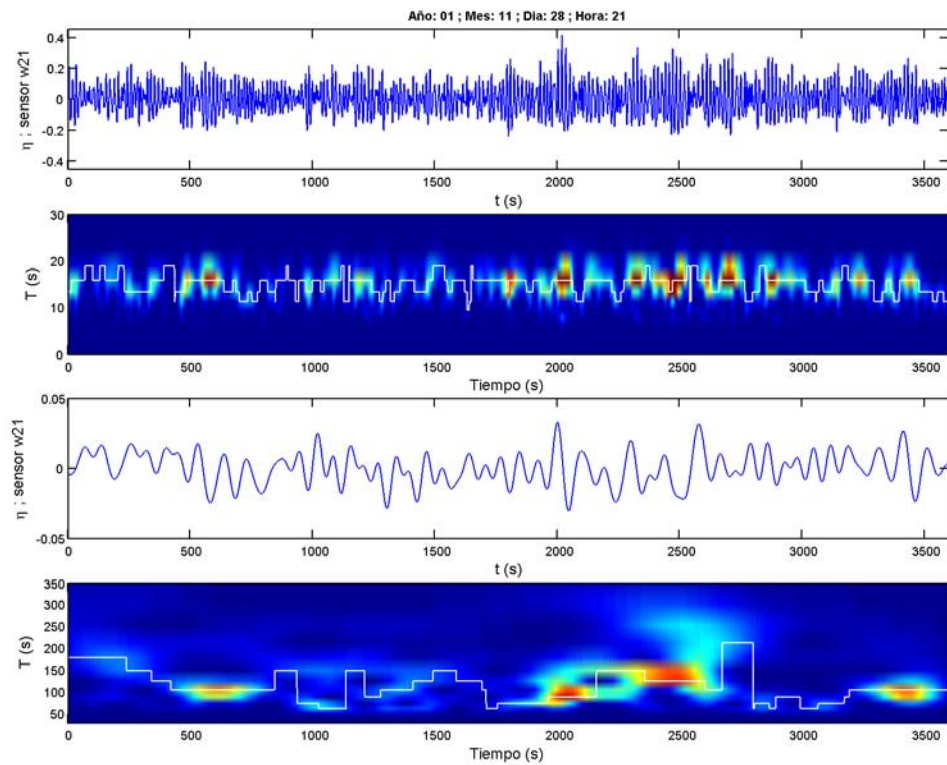


Figura 4.17 Registros de presión correspondientes a la banda gravitatoria (panel superior) y a la banda infragravitatoria (tercer panel), y sus correspondientes espectros wavelet. Fecha 28/11/01 21:00 hrs.

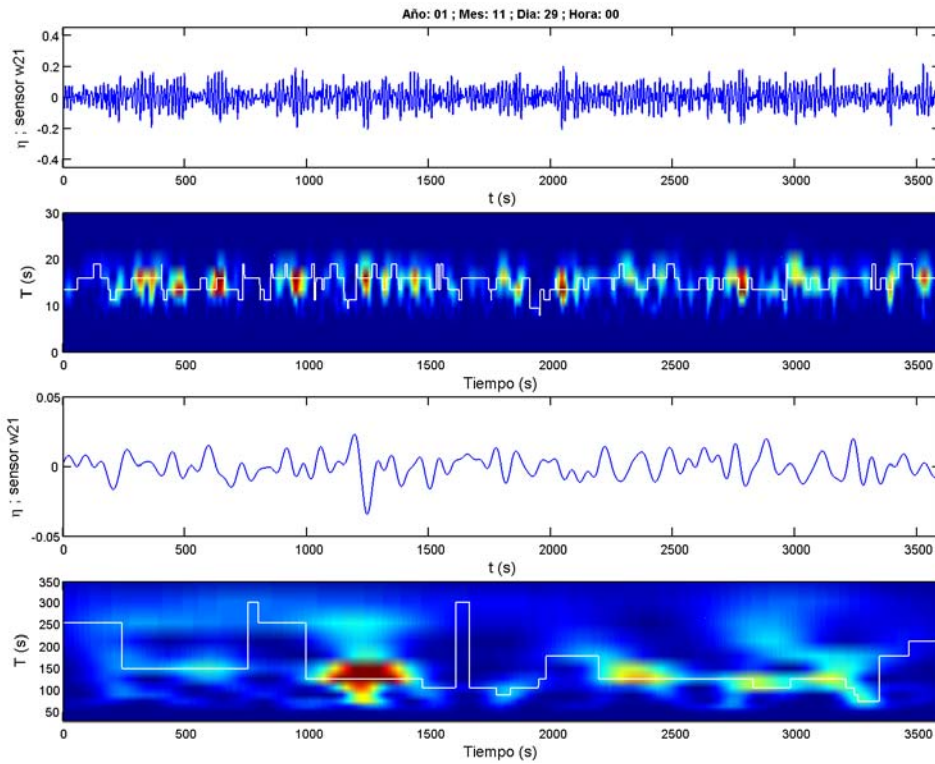


Figura 4.18 Registros de presión correspondientes a la banda gravitatoria (panel superior) y a la banda infragravitatoria (tercer panel), y sus correspondientes espectros wavelet. Fecha 29/11/01 00:00 hrs.

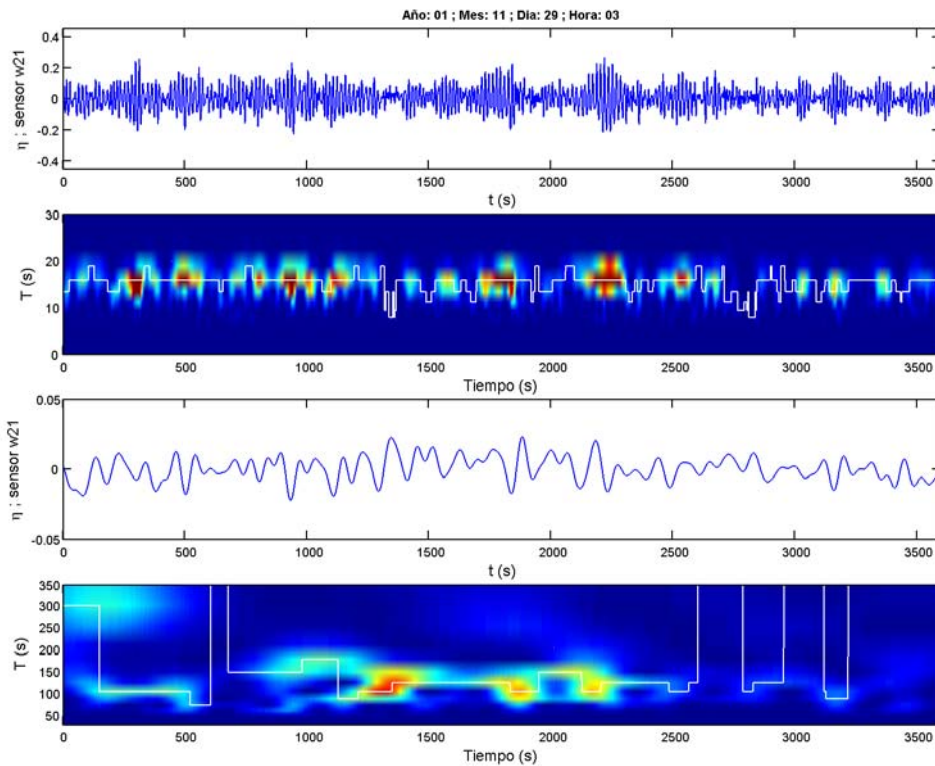


Figura 4.19 Registros de presión correspondientes a la banda gravitatoria (panel superior) y a la banda infragravitatoria (tercer panel), y sus correspondientes espectros wavelet. Fecha 29/11/01 03:00 hrs.

Las figuras 4.16 a 4.19 ejemplifican el fuerte vínculo existente entre la energía de onda corta y la energía asociada a las oscilaciones de onda larga, demostrando que mientras las ondas cortas se manifiestan en paquetes agrupados de energía bien definidos más o menos constantes en el dominio de la frecuencia, la energía para la banda de onda larga presenta grandes variaciones tanto en la concentración energética de sus paquetes de ondas, como en la duración y posición frecuencial de éstos.

Esto implica que los factores desencadenantes de las ondas largas que coexisten con las ondas cortas agrupadas no solo se deben a las combinaciones frecuenciales de las ondas cortas, si no pueden deberse también a diversos factores físicos como la duración de los grupos, a la separación entre éstos, a las diferencias energéticas entre dos o más grupos consecutivos, a los mecanismos disipadores, efectos de contorno, y a sus posiciones en el dominio de la frecuencia.

La técnica de análisis wavelet propuesta en este apartado, desvela un nuevo camino hacia el entendimiento de las relaciones físicas entre ondas cortas y ondas largas, para su futura caracterización no solo en el dominio de la frecuencia a través de correlaciones lineales, sino además en el dominio del tiempo con futuras correlaciones que dependan de un mayor número de variables independientes.

4.6 CONCLUSIONES

4.6.1 Sobre la naturaleza de la onda larga

Una vez realizado el análisis de los registros de oleaje, y tras la revisión de los resultados obtenidos, se plantean una serie de conclusiones.

En primer lugar, el uso de la transformada de Fourier para el análisis de las señales, requiere que las propiedades espectrales de dicha señal se mantengan estables dentro de la duración del registro. Esto es un hecho aceptado para el oleaje de corto periodo, donde se asume que en un periodo de tiempo, conocido como estado de mar, las características del oleaje se mantienen constantes.

Para las ondas infragravatorias, por otro lado, se desconoce si existe estacionalidad. La onda larga presente en los estados de mar registrados no sigue un patrón de comportamiento común y la composición de los espectros en la banda infragravatoria es tal que aparece energía en todas las frecuencias entre 60 y 400 segundos.

En principio habría que definir el modelo matemático de onda larga. Es decir, estamos suponiendo al utilizar la transformada de Fourier, que la onda larga se representa como una suma de senoides de diferente periodo con un desfase entre ellas, como extrapolación del modelo matemático de onda corta. Posiblemente esta herramienta de trabajo no sea del todo afortunada para las ondas infragravatorias.

Por otro lado, se ha observado que existen estados de mar consecutivos que presentan paquetes de energía distribuidos de manera diferente. Esto da pie a dudar de la posible existencia de un estado de mar de onda larga, es decir que no exista una estacionalidad de las características de las ondas infragravatorias. La manera de comprobarlo sería a través del análisis de series de oleaje con una longitud del registro lo suficientemente largas, que permitiera observar la persistencia del oleaje en la banda infragravatoria al tiempo que mantengan el contenido energético en onda corta.

Esto es francamente difícil por lo que la solución podría estar en el empleo de otras herramientas para la determinación de las magnitudes de la onda larga. Posiblemente la convolución de los registros de oleaje con otro tipo de funciones que no exijan la estacionalidad del espectro, con otro significado físico que el que aporta la transformada de Fourier, sería más adecuado para su representación.

4.6.2 Conclusiones sobre la caracterización de la onda larga

Se ha desarrollado una metodología de predicción de la energía en la banda infragravitatoria a partir de los datos de presión en una localización. Con este método, dado un espectro JONSWAP, es posible la simulación de las características de la altura de ola significativa y periodo de pico de onda larga en Gijón y en Lastres, situación extrapolable a cualquier puerto que cuente con mediciones temporales de superficie en campo.

Se observó que la influencia del coeficiente γ es despreciable a la hora de simular la energía de onda larga, por lo que no se ha tenido en cuenta en la formulación, se han obtenido excelentes correlaciones entre los casos estimados y medidos en el ajuste realizado para la altura de la infragravitatoria, con valores altos (98%) incluso en el caso de utilizar todos los estados de mar (95%).

En general, el rango de energía de onda larga está entre 60 y 400 segundos y el factor que más afecta a la situación del periodo de pico en la banda infragravitatoria es el periodo de pico de la onda gravitatoria.

La correlación en el caso del ajuste del periodo de pico de la onda infragravitatoria es más pobre debido a las características de los registros de medida empleados. Es por tanto, aconsejable la realización de una campaña, diseñada especialmente para caracterizar la onda larga, donde la duración de los registros así como la disposición de los sensores sea la adecuada para mejorar los resultados obtenidos en este trabajo, cuyos datos proceden de una campaña realizada para otros fines.

Se establecen los parámetros de ajuste que amplían el estado del arte mostrado en la tabla 4.3.

Autor	α	β	χ
Vis (1985)	2	1.2	0
Nelson (1988)	1.77	1.77	0
Medina (1990)	2	0.5	0
Bowers (1992)			
<i>Port Talbot</i>	1.32	1.17	0.34
<i>Shereham Harbour</i>	0.93	0.99	0.06
<i>Barrow-in-Furness</i>	1.08	1.59	0.36
<i>Bowers (valor final)</i>	1.11	1.25	0.25
Gijón	1.402	0.66	0
Lastres	1.36	0.81	0

Tabla 4.3 Ternas de coeficientes en los ajustes propuestos en este capítulo

El ajuste para el periodo de pico de onda infragravitatoria es: $T_{p \text{ long}}^* = 8.03 \cdot T_p \zeta$

Se propone el empleo de la transformada wavelet como herramienta para el estudio y caracterización de la banda infragravitatoria, revelándose como una poderosa herramienta de análisis de la energía de baja frecuencia, debido a que tiene en cuenta las propiedades no estacionarias de las ondas largas.

La metodología presentada en este capítulo aporta una nueva técnica para obtener una condición de forzamiento adecuada a la hora de alimentar los modelos avanzados de transformación de oleaje, a fin de que simulen fielmente las interacciones entre componentes de onda corta y de onda larga, así como fenómenos complejos como lo es la resonancia portuaria.

4.6.3 Conclusiones sobre las limitaciones de la metodología

Aunque la metodología aplicada podría ser utilizada en otras localizaciones, la formulación propuesta es una aproximación válida únicamente para la bocana de Gijón y el puerto de Lastres, requiriéndose un mayor número de mediciones en diferentes puertos para llegar a conclusiones generales.

La longitud de los registros de medida empleados (≈ 18 minutos) para el puerto de Gijón, provoca que el número de ondas largas que entran en el registro no sea suficiente para una adecuada caracterización de la energía en la banda infragravitatoria.

A pesar de ello, los resultados obtenidos son consistentes con los correspondientes a otros autores mostrando una altísima correlación entre parámetros de onda corta y onda larga. Por tanto, se considera que la aproximación realizada sirve para caracterizar adecuadamente, con la información disponible, las ondas infragravitatorias en Gijón y Lastres.