

---

## *IV. Análisis espectral de las series de tiempo*

---

### IV.1. Consideraciones previas

#### IV.1.1. Consideraciones generales

- **Tipos de espectros**

De la observación de los datos *raw* obtenidos de la boya, se concluye que en el espectro  $S(\omega, \theta)$  se presentan muchos picos locales, y como resultado, una clasificación directa es difícil de obtener.

Para esquematizar los tipos de espectros y hacer un estudio más claro se establece la siguiente clasificación (Lopatoukhin et al, 2002): tres clases principales y algunas subclases. Con más detalle, las clases establecidas son las siguientes (ver figura IV.1):

- ◆ **Espectros de un solo pico (I)**. Prevalece un sistema de oleaje- o bien *sea* (I-1) o bien *swell* (I-2). En consecuencia, existe un solo extremo  $(\omega_{\text{pico}}, \theta_{\text{pico}})$  en la distribución de energía. La separación entre el oleaje *sea* y el *swell* puede ser basado en el valor no dimensional definido como:

$$\delta = (g^* \tau_p^2) / (h_s) = (\pi^2 * g) / (m_{00}^{1/2} * \omega_p^2) \quad [\text{IV.1}]$$

$m_{00}$  es un momento circular central (Kuik *et al.*, 1988)

$\omega_p$  es la frecuencia que aporta la máxima densidad energética (en rps)  
 $\tau_p$  es el inverso de la frecuencia que aporta la máxima densidad energética  
 $h_s$  es la altura de ola significativa  
 $g$  es la constante de gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>)

Si  $\delta > 300$ , entonces el espectro pertenece a un swell, del otro modo pertenece a un tipo *sea*. Se puede utilizar otra forma de diferenciar el tipo de oleaje utilizando el parámetro de anchura espectral  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon^2 = 1 - r^2 \quad [\text{IV.2}]$$

$$r = T_c / T_z \quad [\text{IV.3}]$$

$$\Rightarrow 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad [\text{IV.4}]$$

siendo  $T_c$  el periodo de paso entre crestas y  $T_z$  el periodo de paso ascendente.

Cuando  $\varepsilon$  tiende al valor nulo el oleaje es de tipo regular, teniendo características de oleaje tipo swell. Cuando el valor de  $\varepsilon$  tiende a la unidad el oleaje es de carácter irregular siendo el de tipo *sea* el que lo representa. Aunque en la naturaleza el swell presenta un valor  $\varepsilon \approx 0.4 - 0.5$  y el tipo *sea* tiene un valor  $\varepsilon \approx 0.8$ .

♦ **Espectros de dos picos (II).** Se da con la existencia de dos sistemas de olas simultáneos. Se pueden reconocer tres subclases (dependiendo de los picos dentro del espectro):

⇒ **II-1. Espectros variados con separación tanto en la frecuencia como en la dirección.** En este caso existen dos máximos pronunciados,  $(\omega_{\text{pico1}}, \theta_{\text{pico1}})$  y  $(\omega_{\text{pico2}}, \theta_{\text{pico2}})$ , ambos en el espectro de frecuencia y distribución angular.

⇒ **II-2. Espectros variados con separación sólo por la dirección.** En este caso, sólo hay un pico en el espectro de la frecuencia y dos picos en la dispersión angular. Como resultado el espectro bidimensional, habrá picos en la misma dirección,  $(\omega_{\text{pico1}}, \theta_{\text{pico1}})$  y  $(\omega_{\text{pico1}}, \theta_{\text{pico2}})$ .

⇒ **II-3. Oleaje variados con separación sólo por la frecuencia.** La dispersión angular tiene sólo un pico y el espectro de la frecuencia es amplio con un segundo pico no tan pronunciado.

♦ **Espectros múltiplo (III).** Complicados campos de oleaje de los cuales dos o más suele ser campos swell. En este caso, la dispersión angular tiene más de dos picos pronunciados.

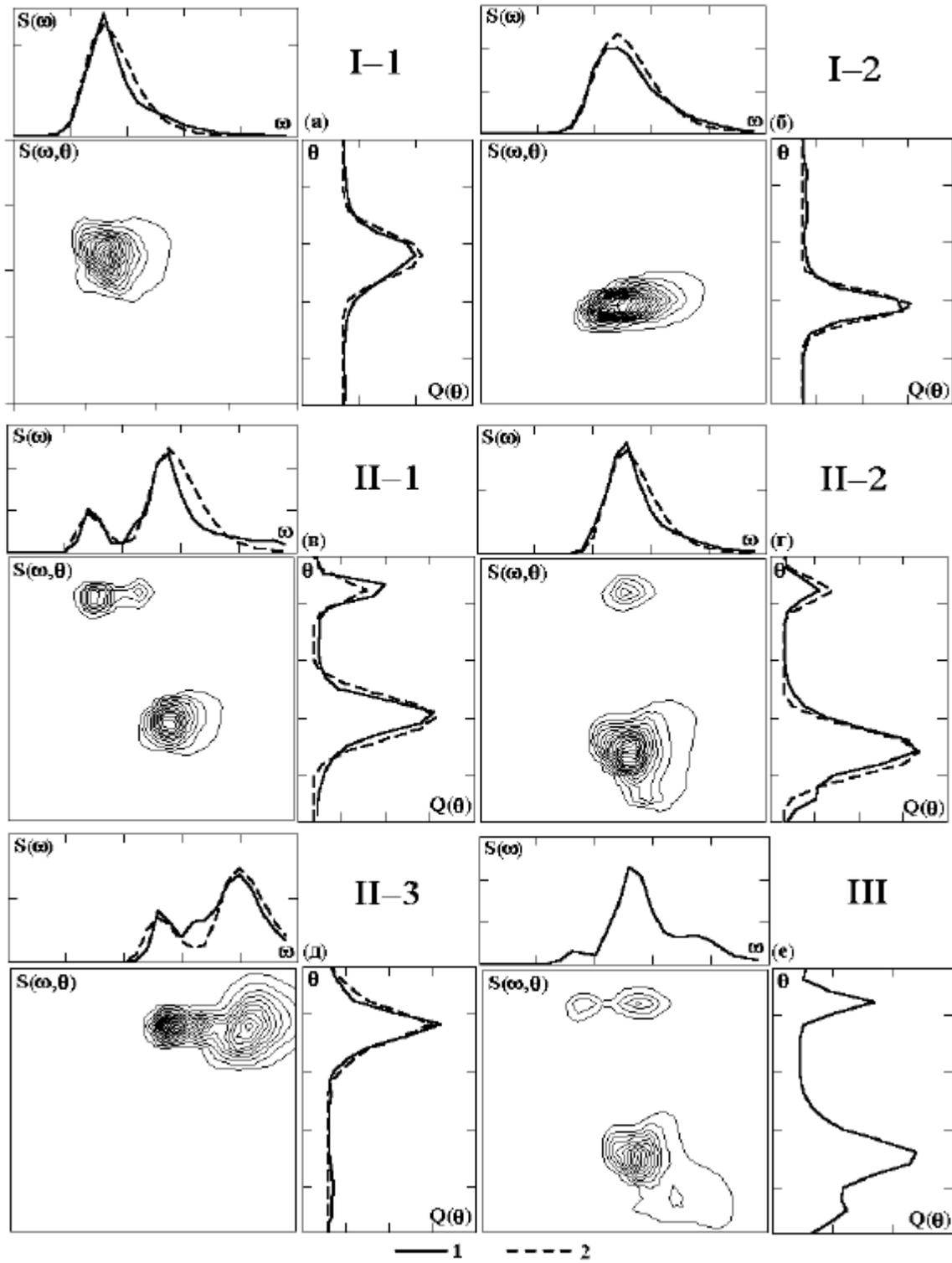


Fig. IV.1 – Clases de oleaje espectral (Fuente: Lopatoukhin et al, 2002)

### • Discriminación de los picos

El estudio de los picos presenta la dificultad de detectarlos. La metodología utilizada para identificar y seleccionar los espectros de dos o más picos es descrita por Guedes Soares y Nolasco (1992). Esta metodología fue diseñada para tener en cuenta la incertidumbre estadística en las estimaciones de las densidades espectrales, debido a que existe la posibilidad no despreciable que un espectro ancho de un solo pico podría parecer un espectro de doble pico (Pierson, 1977).

El criterio para identificar la existencia de los dos o más picos está basado en los intervalos de confianza sobre las estimaciones espectrales. Si los picos de un mismo registro salen de los intervalos de confianza, se considera que representan un mismo pico real. Sin embargo para evitar el problema de los outliers, el criterio adoptado también requiere que el máximo de un espectro es un pico si este se desarrolla durante cuatro bandas de frecuencia consecutivas (si el espaciado corresponde a 0,005 Hz) o tres bandas (si corresponde a 0,01 Hz), y decrece en las cuatro próximas bandas (si el espaciado corresponde a 0,005 Hz) o tres (en el caso de que el espaciado corresponda a 0,01 Hz). Además el orden del segundo pico no debería ser más bajo que un 10 % del máximo. Este umbral se puede considerar más pequeño en el caso que exista una tendencia marcada.

#### IV.1.2. Programa utilizado

El programa *W@ves21* es un software de documento de interfase múltiple (MDI), en el cual los datos del oleaje aparecen como ventanas. Cada formato de datos tiene su propia ventana, en el cual los datos son presentados usando figuras, gráficas y tablas. Cualquiera de ellos se puede hacer visible con el correspondiente panel en la barra de la ventana. Los datos espectrales son desplegados en una ventana espectral, teniendo seis paneles a su vez:

- 1.- Un listado de los datos tomados por la boya en formato de texto ascii.
- 2.- Una figura del espectro frecuencial, 1D.
- 3.- Una tabla con la información de la boya (parámetros como Tz, Hs...).
- 4.- Una figura del espectro dimensional, 2D, sobre plano o superficie en 3D, basados en el Método de la Máxima Entropía (MEM).
- 5.- Una tabla resumen del espectro (con diferentes parámetros).
- 6.- Un ajuste del espectro frecuencial, 1D, a espectros teóricos (Pierson-Moskowitz, Bretschneider y una Gamma-distribución).

El método de la máxima entropía (MEM) (Lygre and Krogstad, 1986) hace una estimación de la distribución direccional de los coeficientes de Fourier a cada frecuencia.

### IV.1.3. Criterio umbral de selección de las tormentas

Para la determinación de un temporal se deben tomar un conjunto de criterios. Estos criterios deben caracterizar el fenómeno en factores de intensidad y duración. Intensidad por lo que respecta a tener que superar un cierto umbral, para poder asegurar que se ha aumentado la energía que puede transmitir el medio a estudiar, y duración, porque es necesario que el temporal no sea un hecho puntual de unos segundos o una hora, sino que se mantenga dicha intensidad durante un cierto tiempo.

Ambos factores no son muy diferentes entre viento y oleaje, a pesar de tratarse de dos medios muy diferentes. Lo que sí se espera es que el viento sea más variable.

En el estudio de los temporales de oleaje, en el mar Mediterráneo, el factor de intensidad es muy particular. Si se hiciese referencia a la costa atlántica, el umbral en oleaje sería de olas de más de 2.5 ó 3 metros. Pero en el mar Mediterráneo, hablar de temporal puede tratarse simplemente de alturas de olas más grandes de 2 metros.

La elección de 2 metros de altura de ola significativa viene dada por un estudio estadístico (Gómez, J. et al., 2001) de los últimos 10 años de oleaje medido en la boya de Cabo Tortosa donde se obtienen los siguientes valores estadísticos

$$\begin{array}{ll} H_{\max} = 9.7 \text{ m} & H_{\max \text{ med}} = 1.39 \text{ m} \\ H_{1/3 \text{ max}} = 4.57 \text{ m} & H_{1/3 \text{ med}} = 0.80 \text{ m} \\ H_{m0 \text{ max}} = 4.91 \text{ m} & H_{m0 \text{ med}} = 0.89 \text{ m} \end{array}$$

Por lo tanto, el valor de 2 metros es un poco superior al doble de la  $H_{1/3}$  o  $H_{m0}$  media. Un valor suficientemente alto para establecer el límite de una situación de temporal.

Los temporales de viento son un ingrediente necesario para la generación de temporales de oleaje. El límite que debe superar la velocidad del viento para poder generar un temporal de oleaje debe estar relacionado con la generación de oleaje de aproximadamente 2 metros.

Este aspecto se puede afrontar con las fórmulas de predicción de oleaje en aguas profundas del Shore Protection Manual (1984) (capítulo 3). Partiendo de una altura de ola  $H_s$  deseada, y haciendo uso de las ecuaciones de predicción de oleaje, se obtiene un valor de  $U_A$ , que es el factor de tensión del viento (una velocidad del viento ajustada). La expresión para fetch completamente desarrollado es la que sigue:

$$H_{S0} = 2.4821 \cdot 10^{-2} \cdot U_A^2 \quad [\text{IV.5}]$$

donde  $U_A$  es la medida en metros por segundo y  $H_{S0}$  en metros.

El valor de  $U_A$  es de 8.976 m/s. Una vez obtenido el valor de  $U_A$  se puede pasar a  $U$  (velocidad del viento corregida), mediante la expresión:

$$U_A = 0.71 \cdot U^{1.23} \quad (U \text{ en m/s}) \quad [\text{IV.6}]$$

El valor obtenido ha sido de 7.866 m/s, que después de aplicar los coeficientes de corrección de estabilidad ( $R_T = 1.1$ ), por los efectos locales ( $R_L = 1$ ) y la duración, se ha calculado una velocidad del viento a 10 metros de altura de 7.15 m/s, que puede considerarse el límite de trabajo del temporal de viento en la presente tesina.

Debe comentarse que esta velocidad del viento umbral no es exactamente el valor límite, y puede ser que en situaciones de viento de costa, con un fetch muy pequeño (de unas decenas o un centenar de kilómetros) realmente no sea posible generar oleajes con una velocidad tan pequeña.

El factor de duración se puede establecer para la búsqueda de los temporales de oleaje y de viento estableciendo la duración mínima del temporal en 6 horas. Este criterio de selección ha sido tomado ya que pueden existir ráfagas de viento que debido al corto espacio de tiempo en el que actúan o por tener un fetch corto no generen un oleaje lo suficientemente importante. Se considera que para un espacio mínimo de 6 horas, con la velocidad mínima ya mencionada, se puede generar un oleaje de características importantes.

## IV.2. Análisis de las tormentas

### IV.2.1. Análisis de la tormenta de noviembre del 2001

#### IV.2.1.1. Descripción general de la tormenta

Entre los días 9 y 16 de noviembre de 2001 se produjo en el Mediterráneo Occidental una situación meteorológica muy compleja, caracterizada fundamentalmente por fuertes vientos y temporal en el mar, pero también por lluvias localmente fuertes o muy fuertes y en algunos casos por el episodio de nevadas a cotas bajas.

Tanto la costa mediterránea de la Península Ibérica como las Islas Baleares y el norte de África sufrieron las graves consecuencias de los temporales de viento y lluvia que a lo largo de una semana afectaron estas zonas, especialmente sensibles a los fenómenos meteorológicos adversos, poco frecuentes pero muy intensos y persistentes.

Los vientos fueron especialmente intensos los días 10, 11, 14 y 15 en la costa central, aunque la tramuntana y el mestral soplaron ya desde el día 9 y no pararon prácticamente en todo el episodio. Las olas levantadas en el mar por estos impetuosos vientos llegaron a superar los 6 metros<sup>1</sup> de altura significativa (según Berghaenel, Grupo de Predicción i Vigilancia del Centre Meteorològic Territorial de Catalunya (INM)). Concretamente el observatorio del Estarrit registró olas con alturas significativas entre los 3 metros y los 5 metros del este-noreste el día 11, siendo el temporal más importante del citado año y uno de los más importantes de los últimos 5 años en dicho observatorio.

Por otro lado el sistema de detección de olas del SMC-UPC registró el día 15 una ola máxima de 9.5 metros en el delta del Ebro. El Ministerio de Medio Ambiente confirmó, que en la vertiente mediterránea española, este temporal de mar había sido el más fuerte de los últimos 20 años.

La altura de ola registrada en la boya de Cabo Tortosa siguió la evolución de la figura IV.2.



Fig. IV.2 - Evolución de la altura de ola (Fuente: Elaboración propia)

<sup>1</sup> Como se verá en el estudio posterior, el oleaje que aporta la mayor parte de energía en la tormenta es un oleaje swell, y no un oleaje sea.

En la figura IV.2 se observa la evolución seguida por la altura de ola y se pueden ver dos picos claramente diferenciados. El primero alcanza su máximo en el registro de las 9 horas del día 11/11/2001 y el segundo lo alcanza en el registro de las 13 horas del día 15/11/2001.

Por otro lado, junto con la altura de ola significativa es necesario observar la velocidad del viento (figura IV.3) para poder concretar la aportación del viento a la tormenta.

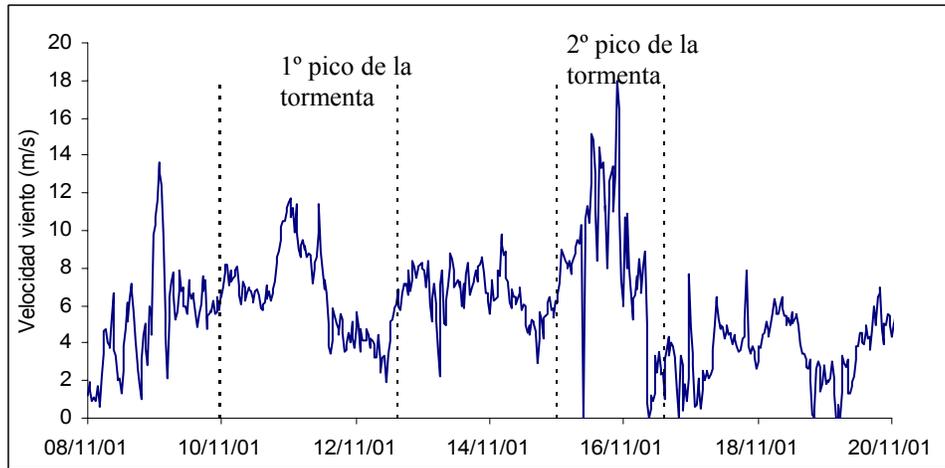


Fig. IV.3 - Velocidad del viento en la primera tormenta estudiada con separación de los periodos estudiados. Las líneas verticales separan las diferentes secciones de la tormenta (Fuente: Elaboración propia)

Procedente de los registros, se puede dividir el periodo analizado en diferentes subperiodos:

1. Desde el inicio de los datos hasta las 00 horas del día 10 de noviembre. Este primer periodo se caracteriza por ser una zona de aumento de la velocidad del viento, donde el oleaje que gobierna es el *sea*. En la figura IV.4 se muestran diferentes espectros de este periodo.

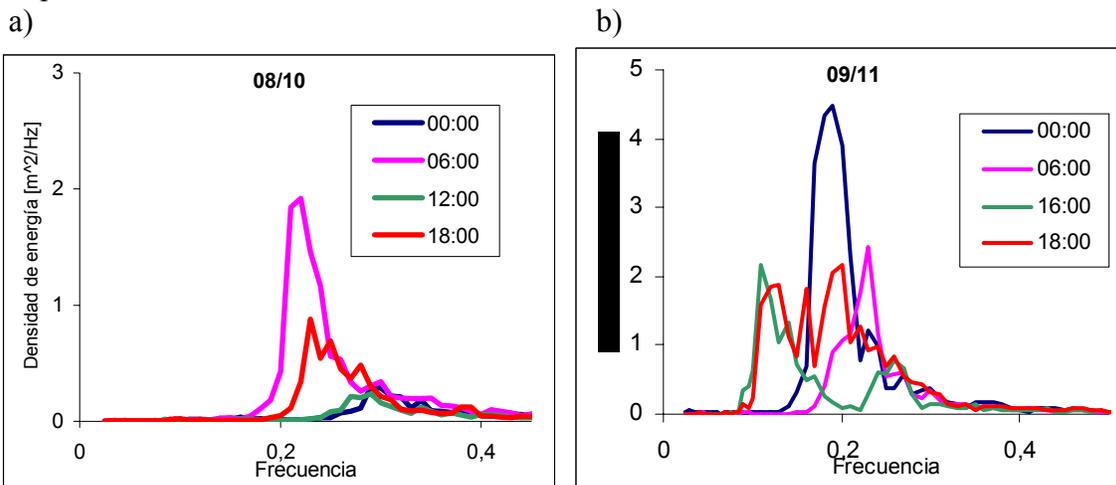


Fig. IV.4.a y IV.4.b - Muestra espectral del primer subperiodo (Fuente: Elaboración propia)

En la figura IV.4.a se observa claramente la evolución creciente del oleaje *sea*, primero, y su decrecimiento, después, debido a un descenso durante un periodo puntual de la velocidad del viento. En la figura IV.4.b se observa como vuelve a aparecer un pico *sea* en las primeras horas hasta la aparición de la bimodalidad en los registros finales del día.

- Desde las 00 horas del día 10 de noviembre hasta las 15 horas del día 12. Este segundo subperiodo se constituye como el primer pico de esta primera tormenta. En esta fase se observa la presencia de swell (dominante) junto a oleaje *sea*.

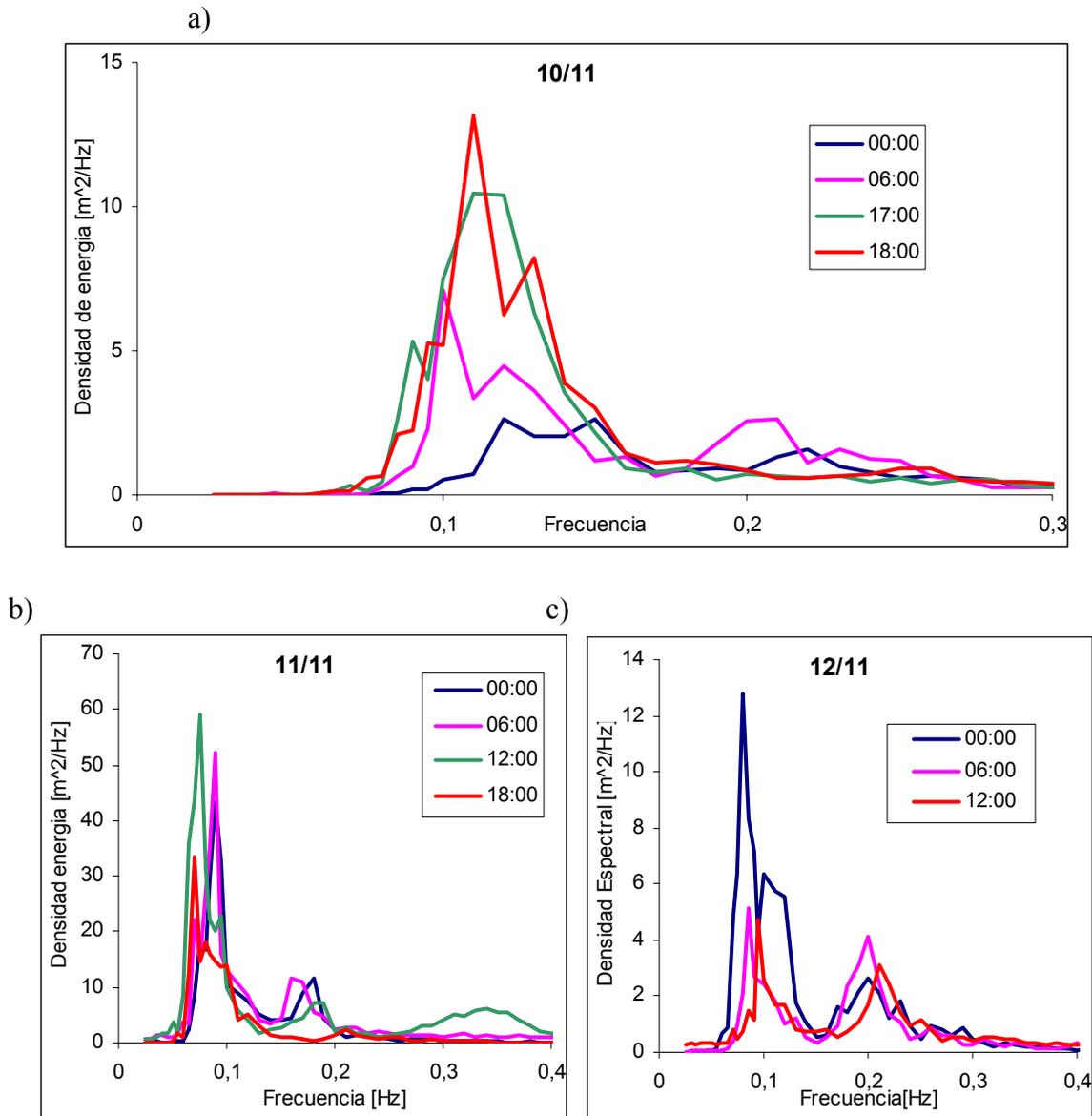


Fig. IV.5.a, IV.5.b y IV.5.c - Muestra espectral del segundo subperiodo (Fuente: Elaboración propia)

Se observa que existe un pico muy marcado que está asociado a un gran cantidad energética y que se encuentra en frecuencias bajas (swell). Por otro lado, se puede observar otro segundo pico con menor energía asociada y en frecuencias más altas (sea).

3. Desde el final del subperiodo anterior hasta las 00 horas del día 15 de noviembre. En este caso vuelve a dominar el oleaje tipo *sea* con presencia de oleaje tipo *swell*.

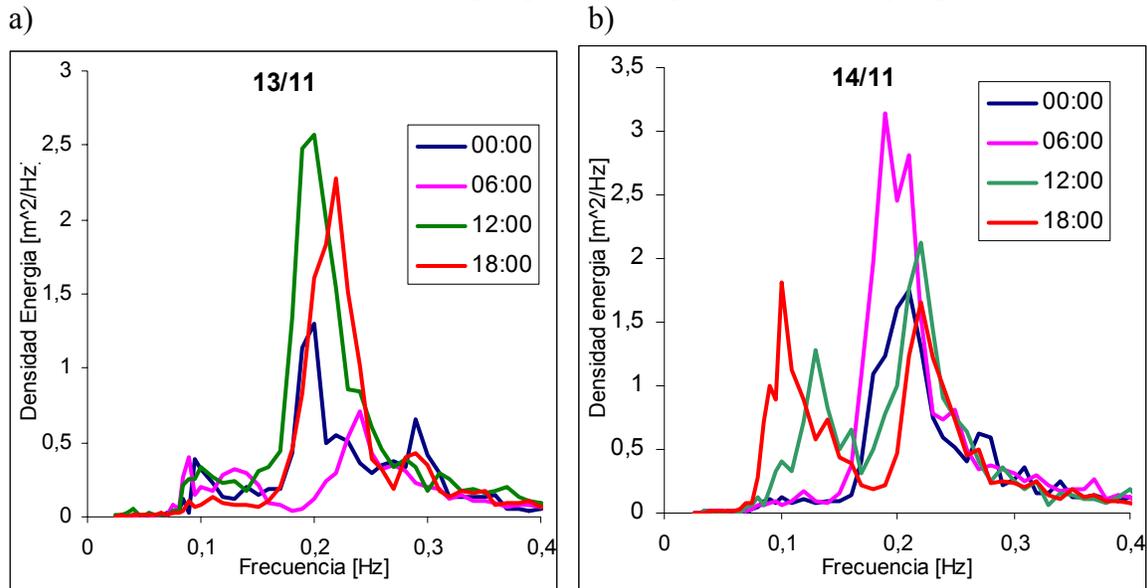


Fig. IV.6.a y IV.6.b – Muestra espectral del tercer subperiodo (Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar que la mayor parte de la energía se puede asociar a las frecuencias más altas, y en consecuencia, relacionado con oleaje *sea*. Aunque existe un oleaje secundario en las frecuencias más bajas, que se puede observar sobre todo en la figura IV.6.b

4. Desde las 00 horas del día 15 hasta las 15 horas del día 16. En este subperiodo se produce el segundo pico del temporal.

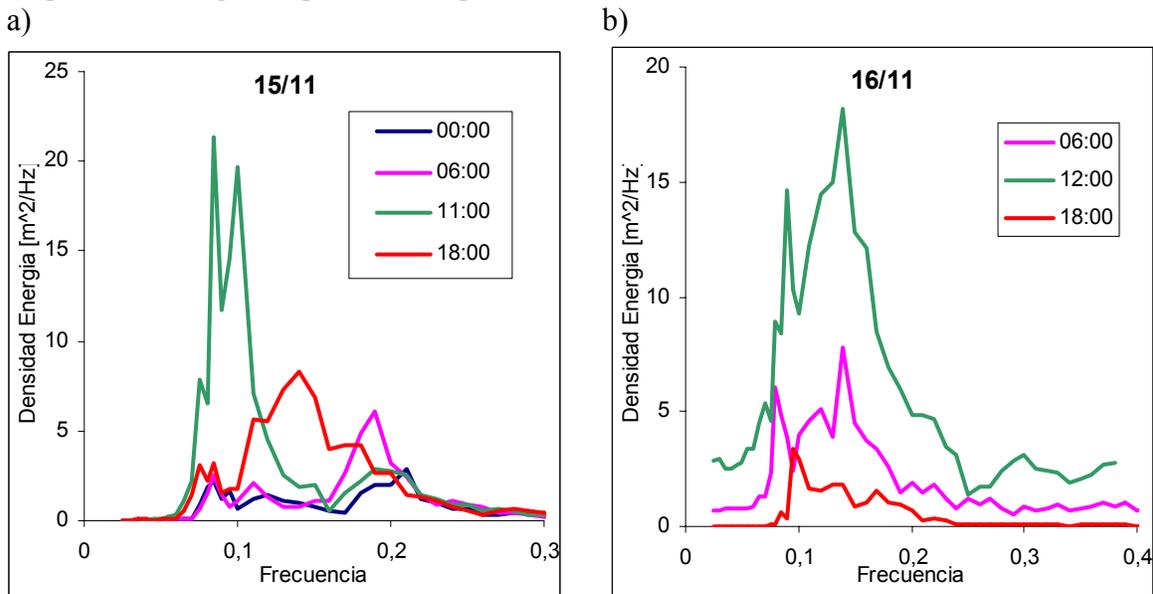
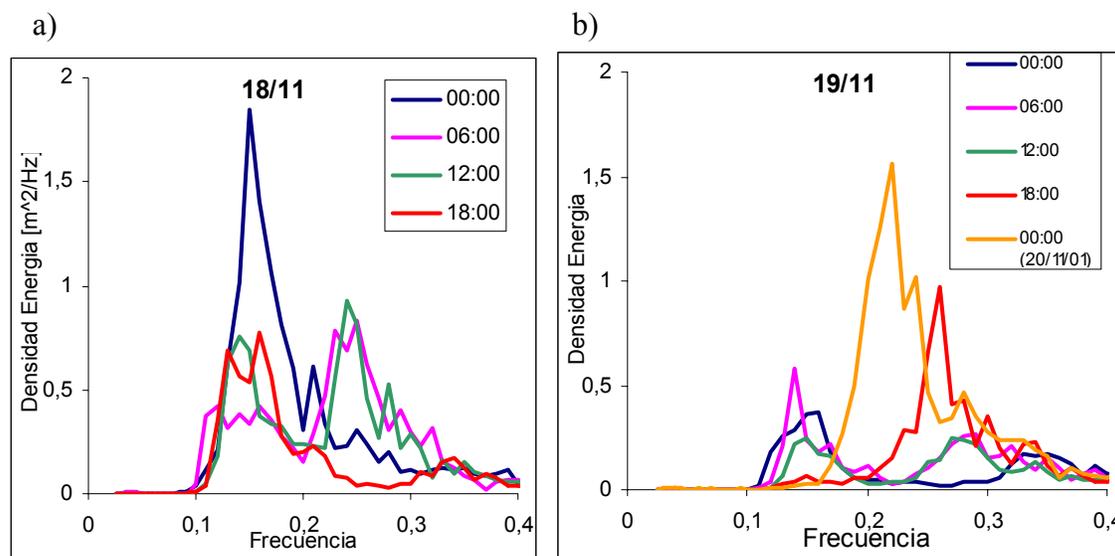


Fig. IV.7.a y IV.7.b - Muestra espectral del primer subperiodo (Fuente: Elaboración propia)

En las figuras IV.7.a y b no se observa una tendencia muy clara. En la figura a se observa la aparición de un fuerte swell hacia las 11:00 horas que antes no se detecta y en los registros posteriores se observa un gran descenso de su aportación energética. La figura IV.7.b tiene una estructura poca clara ya que parece observarse 2 picos distintos muy próximos en frecuencia planteándose la cuestión de que tipo de oleaje se tratan.

- Desde las 16 horas del día 16 hasta las 00:00 horas del día 20/11/01. En este último periodo el temporal mengua en intensidad alternando el dominio entre el oleaje swell y el leve *sea*.



En la figura IV.8.a se observa una estructura bimodal pero con un claro dominio swell. En la figura b se observa otra estructura bimodal pero esta vez con un dominio *sea*.

Dada la magnitud del temporal, se convierte en una fuente importante de estudio y de este modo obtener un análisis de las consecuencias que produjo. En consecuencia un estudio detallado mediante los espectros permitirá analizar diferentes aspectos relevantes de todo el proceso. Se deben establecer directrices para la mejora de los modelos existentes, haciendo hincapié en aquellos puntos donde pueden ser erróneos, así como la extracción de conclusiones a cerca de los espectros direccionales frente a los escalares.

#### IV.2.1.2. Descripción espectral del primer pico

El primer pico del temporal comprenderá desde las 00:00 horas del día 10 de noviembre del 2001 hasta las 15 horas del día 12 de noviembre. Se procede al estudio mediante un análisis espectral, (tanto direccional como escalar) y observando la diferencia en la aportación de resultados sobre el estudio.

Clase	Subclase	10 de noviembre	11 de noviembre	12 de noviembre	Número total de registros
I	I-1				0
	I-2				0
II	II-1	13	15	12	40
	II-2				0
	II-3				0
III					0
Total		13	15	12	40

Tabla IV.1 – Clasificación del oleaje para el primer pico de la tormenta

Es necesario comentar que siendo un temporal de tal magnitud produjo que en algunos momentos la boya sufriera distorsiones en las mediciones hechas en diversos registros. Estos registros son los archivos *raw* referentes a los siguientes puntos horarios:

En el día 10/11: 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 19:00, 20:00, 21:00 y 22:00 horas  
 En el día 11/11: 9:00, 10:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 19:00 y 21:00 horas

El grupo de espectros de dos picos (clase II) es caracterizado por la existencia de dos sistemas de olas simultáneamente dentro del cual se considera el sistema de espectros variado con separación tanto en la frecuencia como en la dirección (II-1). Dicho oleaje es un sistema único dentro de este primer pico. Destacar que en los registros 16h, 17h y 18h del 10/11 el oleaje *sea* es muy debil, con un claro dominio del oleaje swell que puede llegarse a confundir por un sistema unimodal de olas.

La evolución sufrida por la densidad energética a lo largo de este primer pico del temporal considerado fue la mostrada en la figura IV.9. En la figura IV.10 se observa que el pico de  $T_z$  llega antes, como era de esperar, que el pico de  $H_s$  ya que previamente llegan las ondas largas.

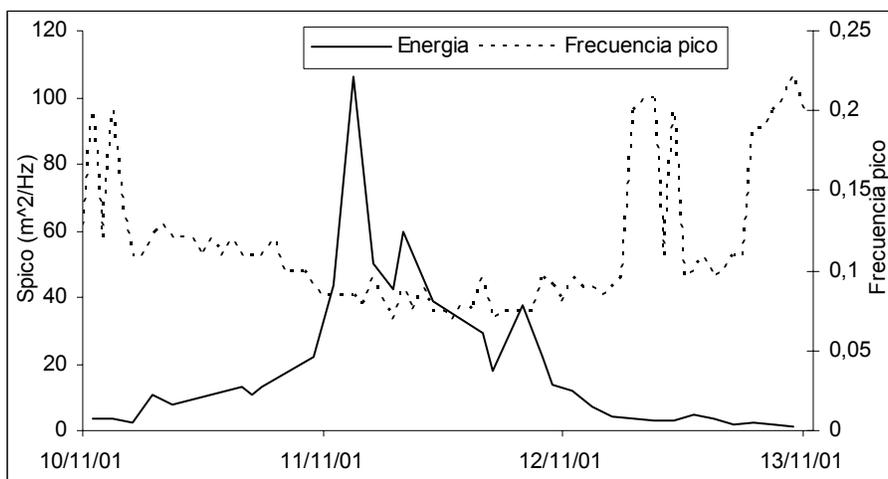


Fig. IV.9 – Evolución energética para la frecuencia pico (Fuente: Elaboración propia)

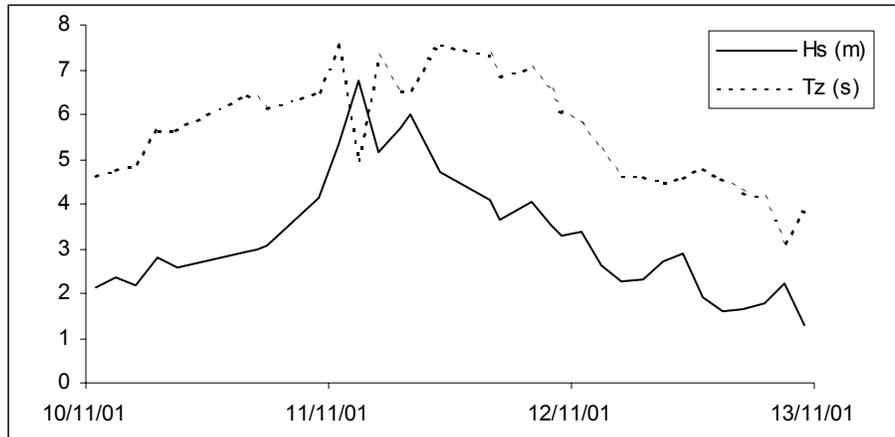


Fig. IV.10 – Evolución altura de ola significativa y periodo ( $T_z$ ) (Fuente: Elaboración propia)

El día **10 de noviembre** empieza caracterizado por espectros bimodales variados con separación tanto en la frecuencia como en la dirección. En los registros hasta las 9 de la mañana prevalece el sistema bimodal formado por  $(\omega_{pico1}, \theta_{pico1}) = (0.12 \text{ Hz}, 78^\circ)$  y  $(\omega_{pico2}, \theta_{pico2}) = (0.22 \text{ Hz}, 335^\circ)$ , siendo el primero tipo swell y el segundo tipo *sea*. En dicho registro, se observa que el primero de los picos ha experimentado una evolución ascendente en términos energéticos y el segundo ha experimentado una disminución respecto a los registros anteriores, aunque la presencia de dicho pico significa una aportación energética importante. La evolución en los siguientes registros producirá que entre las 15 y las 19 horas domine el oleaje tipo swell ( $0.12 \text{ Hz}, 70^\circ$ ) sobre un débil oleaje *sea*.

Posteriormente los picos se presentan en las posiciones  $(0.12 \text{ Hz}, 65^\circ)$  y  $(0.19 \text{ Hz}, 335^\circ)$ , es decir, con una distribución bastante parecida a la bimodal que imperaba en el inicio del día.

El día **11 de noviembre** continúa la tendencia bimodal del día anterior con picos situados, aproximadamente, en la misma posición, es decir  $(0.10 \text{ Hz}, 75^\circ)$  y  $(0.19 \text{ Hz}, 335^\circ)$ . Dentro del aspecto bimodal remarcaremos el registro de las 5:00 horas, donde  $(0.10 \text{ Hz}, 75^\circ)$  se atenúa levemente. Debe destacarse que dentro del pico se puede apreciar en los espectros direccionales una dispersión energética, asociada al pico swell, en una frecuencia reducida y a lo largo de un rango de direcciones. Esta situación puede verse en la figura IV.11.

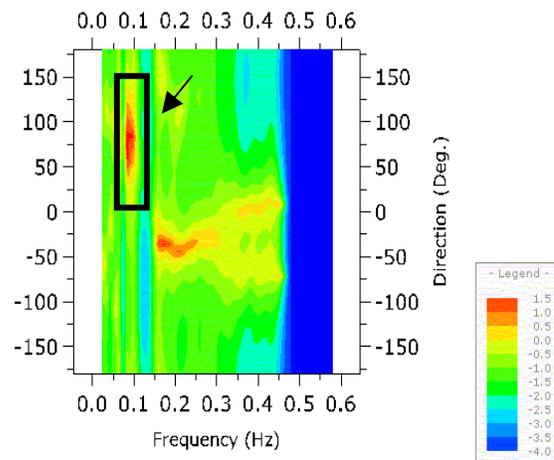


Fig. IV.11 - Espectro direccional del registro 3:00 horas 11/11 (Fuente: Elaboración propia)

La dirección media del pico se encuentra alrededor de los 86°. El pico swell se distribuye alrededor de 100° (entre los 30° y los 130°) mientras que se sitúa en una frecuencia de 0.09 Hz. Esta dispersión del pico es poco habitual; el rango de frecuencias en que se puede ver es muy estrecho y el rango angular es muy ancho. Esta situación produce que las estructuras marítimas o las playas, por ejemplo, puedan resultar afectadas de forma mucho mayor de lo esperado debido a la forma de aporte de energía para este pico.

Esta tendencia también se puede observar en otros registros, como por ejemplo las 22 horas, aunque se presenta a menor escala. En la figura IV.12 se puede observar el espectro escalar referido al mismo registro. El rango angular en el que se dispersa el pico swell no se observa en el espectro frecuencial

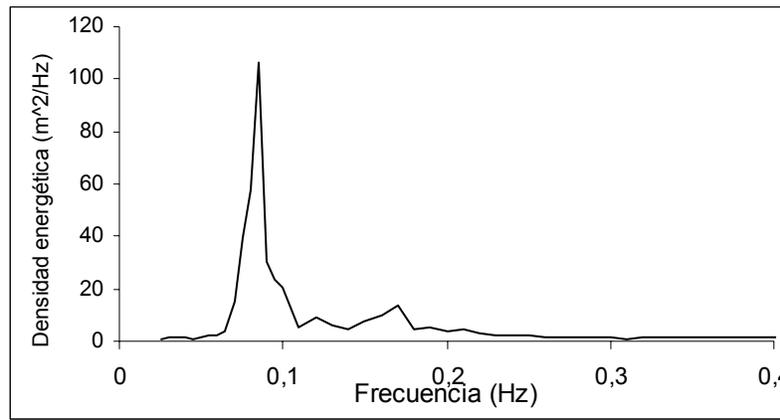


Fig. IV.12 - Registro escalar de las 3 horas del 11/11 (Fuente: Elaboración propia)

Otro fenómeno a comentar en este primer pico de la tormenta, es la situación que se produce en el mismo pico swell comentado en el caso anterior pero para diferentes registros. Se puede observar claramente en el figura IV.13 perteneciente al registro de las 7:00 horas, que el pico swell aparece transformado en dos picos separados únicamente por la frecuencia situados en la misma dirección:  $(\omega_{pico11}, \theta_{pico11}) = (0.065 \text{ Hz}, 75^\circ)$  y  $(\omega_{pico12}, \theta_{pico12}) = (0.13 \text{ Hz}, 75^\circ)$ .

Dicho fenómeno se puede ver también en los registros de las 8, 17, 20, 22 y 23 horas del día 11 de noviembre.

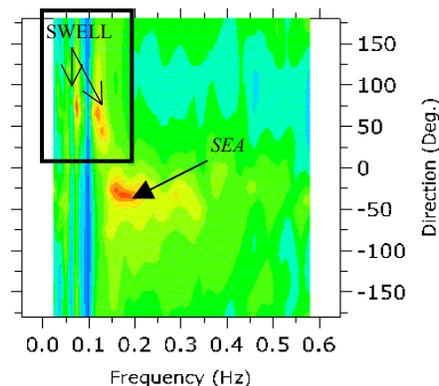


Fig. IV.13 - Espectro direccional. Registro: 7 horas del día 11/11 (Fuente: Elaboración propia)

Dada esta situación, se podría considerar un registro de tipo III, pero según la metodología seguida para la identificación y selección de los picos es un mismo oleaje el que produce dos picos y en consecuencia se considera un registro II-1.

Esta situación del espectro direccional se puede contrastar con el escalar, como se ve en la figura IV.14.

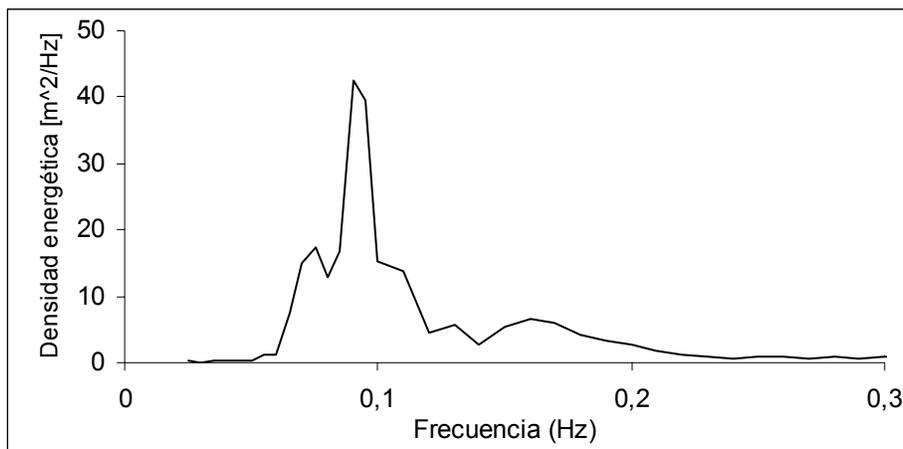


Figura IV.14 – Espectro frecuencial del registro 7 horas del día 11/11 (Fuente: Elaboración propia)

En el espectro frecuencial se observan los dos picos relativos al oleaje swell ya citados. Se considerará un único oleaje swell.

El día **12 de noviembre** el temporal mengua. El espectro es del tipo II-1 con los picos (0.9 Hz, 75°) y (0.22 Hz, 335°).

### IV.2.1.3. Descripción espectral del segundo pico

El segundo pico del temporal comprenderá el estudio del periodo entre las 00:00 horas del día 15 de noviembre del 2001 hasta las 15 horas del día 16 de noviembre. Se seguirá utilizando la comparación de las condiciones direccional como escalar en los diferentes espectros. La clasificación que tenemos en este caso es la que sigue:

Clase	Subclase	15 de noviembre	16 de noviembre	Número total de registros
<b>I</b>	I-1		3	<b>3</b>
	I-2			<b>0</b>
<b>II</b>	II-1	8	2	<b>10</b>
	II-2		2	<b>2</b>
	II-3	6		<b>6</b>
<b>III</b>				
<b>Total</b>		14	7	<b>21</b>

Tabla IV.2 – Clasificación del oleaje para el segundo pico de la tormenta

En este segundo pico también se observan diferentes archivos que presentan distorsiones, aunque los registros perturbados son mucho menores:

En el día 15/11: 21:00 horas

En el día 16/11: 3:00, 12:00, 13:00, 14:00, 21:00 horas

En primer lugar, destacar la existencia del oleaje caracterizado por espectros de dos picos (II), con existencia de dos sistemas de olas simultáneamente dentro del cual predomina el sistema de espectros variado con separación tanto en la frecuencia como en la dirección (II-1) en el día 15 de noviembre. Existen otro grupos dentro del grupo II: espectros variados con separación sólo por la dirección (con sólo un pico en el espectro de la frecuencia y dos picos en la distribución angular) y espectros con oleaje variado con separación sólo por la frecuencia.

Otro grupo de oleaje se puede ver en los espectros con un solo pico (I), donde prevalece únicamente el sistema (I-1), es decir tipo *sea*.

En este segundo pico el oleaje *sea* aporta un papel energético más importante que en el primer pico de la tormenta aunque el mayor valor energético lo produce un oleaje swell.

La evolución sufrida por la densidad energética a lo largo de este segundo pico del temporal considerado se puede seguir en la figura IV.15.

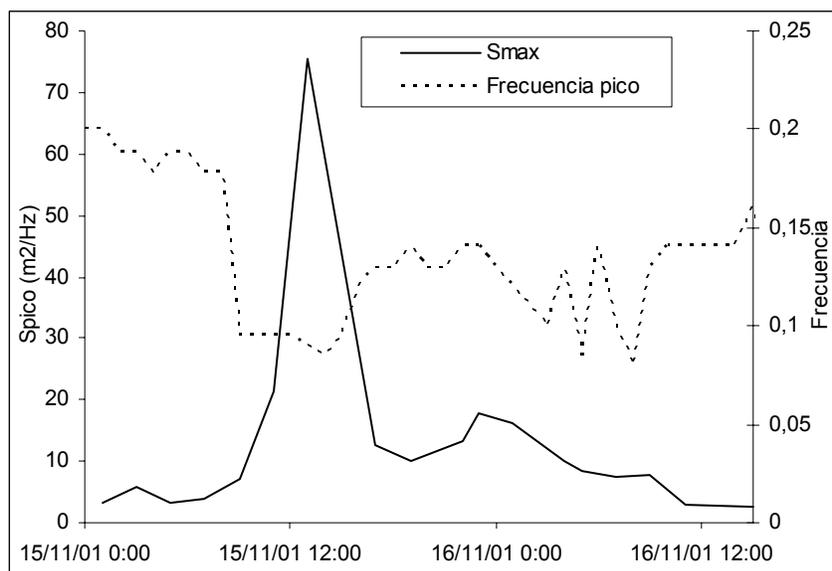


Fig. IV.15 – Evolución energética para la frecuencia pico (Fuente: Elaboración propia)

Estableciendo una comparativa de duración temporal entre los picos de la tormenta, se observa que el primer pico del temporal tiene una duración superior a la de este segundo pico.

La evolución energética pico de esta segunda parte de la tormenta tiene un máximo muy marcado, que se produce en el registro de las 13:00 horas del 15/11. Luego desciende pero se mantiene energéticamente estable, alrededor de 5 - 15 m<sup>2</sup>/Hz, hasta el final del periodo considerado. Si comparamos la evolución de la energía del primer pico del

temporal, figura IV.9, y la comparamos con la figura IV.15, se observa que en el primer pico considerado se tiene una densidad energética pico bastante superior a este segundo periodo, aunque ambos tienen una altura de ola significativa de valor muy similar. También se puede mostrar la evolución de la altura de ola y del periodo pico para este segundo espacio del temporal.

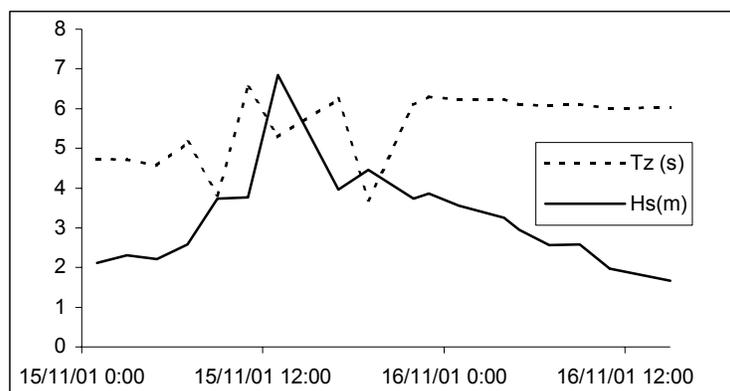


Fig. IV.16 – Evolución de  $H_s$  y el periodo ( $T_z$ ) (Fuente: Elaboración propia)

Es interesante observar en la figura IV.16 que antes que la altura de ola significativa máxima lleguen las olas más largas. Se observa en la evolución de la  $H_s$  una tendencia ascendente hasta el punto donde se produce el máximo energético, momento a partir del cual desciende, con el tiempo. El periodo  $T_z$  tiene tendencia a crecer, con alguna irregularidad, hasta las 22:00 horas del 15/11, momento en el cual se muestra constante, con una tendencia ligeramente descendente, hasta el final del periodo considerado aunque el periodo pico sufre variaciones, primero aumentando y posteriormente disminuyendo.

En el periodo de inicio del segundo pico del temporal, 00:00 horas del 15/11/01, se considera una tendencia bimodal con un oleaje swell y otro *sea*. El oleaje tipo swell viene de la dirección  $100^\circ$ , en la frecuencia 0.085 Hz, y el *sea* de  $335^\circ$ , con frecuencia 0.21 Hz. Esta tendencia se mantiene hasta las 5 horas aunque el pico swell es más débil que el *sea*.

Alrededor de las 6 horas empieza a cambiar gradualmente la dirección del viento. Esta evolución llevará la dirección del viento que en los anteriores registros soplaban en la dirección  $330^\circ$  hasta la dirección  $75^\circ$ . El pico *sea* situado en la dirección  $330^\circ$  menguará, debido al cambio de la dirección del viento, hasta las 13 horas momento en el que desaparece.

En la dirección  $75^\circ$  se acaba observando que el oleaje swell tendrá un aumento energético. El cambio de dirección del viento también acaba por crear un oleaje *sea* en la misma dirección que dicho swell (el swell coincide con la dirección del viento). La tendencia del pico principal se mantendrá situada en la dirección  $75^\circ$ .

Debe observarse el fenómeno, ya comentado en la primera tormenta, que se produce en el espectro direccional del registro tomado a las 13:00 y 15:00 horas donde el pico ( $0.12$ ,  $75^\circ$ ) se distribuye a lo largo de  $100^\circ$  mientras que se sitúa en una frecuencia de 0.12 Hz.

Observar que dicho fenómeno se producía en la misma posición de frecuencia y dirección en la primera tormenta.

Posteriormente, el oleaje swell menguará, pasando a ser el completamente dominante el oleaje *sea*.

Empezando el día 16 la dirección del viento cambiará, presentando una variación entre el intervalo  $130^\circ \sim 180^\circ$ . En los primeros registros del día 16 existe una tendencia dominante de *sea* y con la variación de la dirección del viento, aunque se mantiene el pico situado en la dirección  $75^\circ$ , aparece otro pico situado en el rango de la nueva dirección del viento aunque de menor importancia dado que la fuerza del viento mengua. El conjunto global de acontecimientos produce que en los registros considerados hasta el fin de este segundo pico se presenten una sucesión de registros de tipo I-1, II-1 o II-2, aunque la aportación energética sea menor.

## IV.2.2. Análisis de la tormenta de marzo-abril del 2002

### IV.2.2.1. Descripción general de la tormenta

Entre los días 27 marzo y 6 de abril del 2002 se produjo la segunda tormenta a estudiar. Este segundo episodio a estudiar cabe destacar que no fue una situación meteorológica tan intensa como el primer temporal a estudiar, aunque también fue caracterizado por fuertes vientos y temporal en el mar, pero también por lluvias localmente fuertes.

Los vientos fueron especialmente intensos los días 28 y 29 de marzo y 2 y 3 de abril, aunque los vientos soplaron ya desde el día 27 de marzo, reduciéndose considerablemente entre los días 31 de marzo e inicio del 2 de abril, dentro del episodio de estudio. Las olas generadas en el mar por estos impetuosos vientos llegaron a los 3,25 metros de altura significativa en la boya de Tortosa.

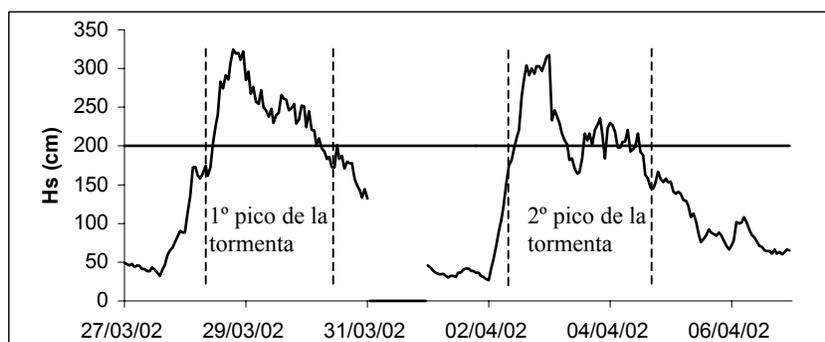


Fig. IV.17 - Evolución de la altura de ola, junto a la indicación de los 2 m como referencia del temporal  
(Fuente: Elaboración propia)

En la figura IV.17 se ve la evolución seguida por la altura de ola donde se pueden ver dos picos claramente diferenciados. El primero alcanza su máximo (325 cm) en el registro de las 19 horas del día 28/3/2002 y el segundo (317 cm) lo alcanza en el registro de las 00 horas del día 3/4/2002.

Por otro lado, la velocidad del viento tuvo la evolución que se observa en la figura IV.18.

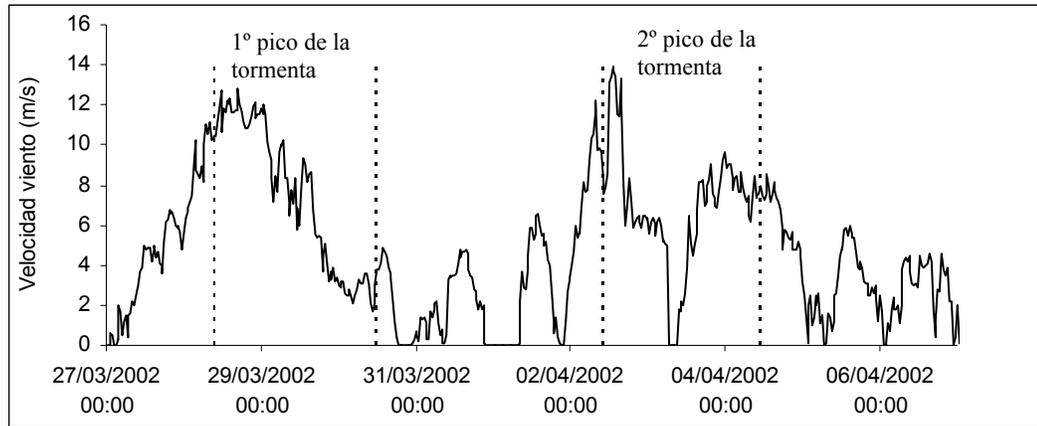


Fig. IV.18- Velocidad del viento ( $U_{10}$ ) en la primera tormenta estudiada. Las líneas verticales separan las diferentes secciones de la tormenta (Fuente: Elaboración propia)

Procedente de los registros, se puede dividir el periodo analizado en diferentes subperiodos

1. Desde el inicio estudiado, 27/3/02 00:00 horas, hasta las 10 horas del día 28/3 de abril. Este primer periodo se caracteriza por ser una zona de aumento de viento, donde el oleaje que gobierna es el *sea*. En la figura IV.19 se muestran diferentes espectros de este periodo.

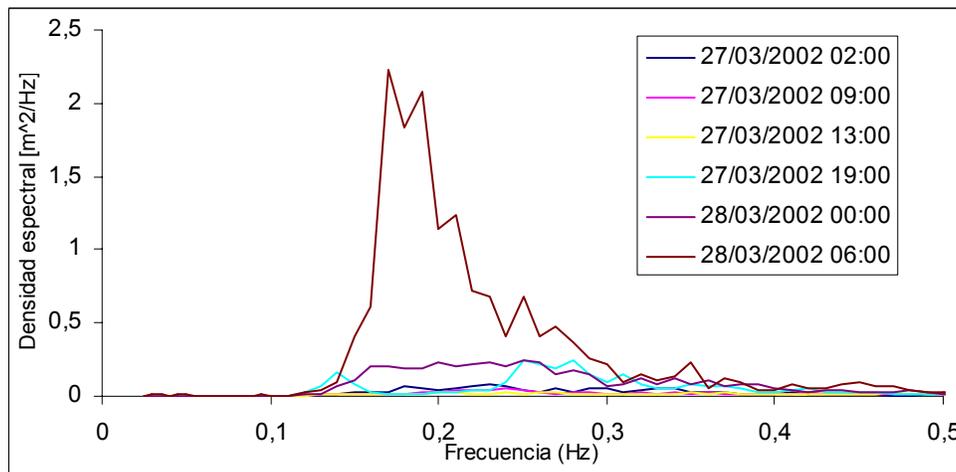


Fig. IV.19 - Muestra espectral del primer subperiodo (Fuente: Elaboración propia)

Se observa en la figura IV.19, que los oleajes no poseen una gran densidad energética, sin embargo, se observa una evolución del oleaje *sea*, donde la frecuencia pico disminuye y la densidad energética del pico aumenta.

2. Desde las 11 horas del 28 de marzo hasta las 12 horas del día 30/3. Este segundo subperiodo se constituye como el primer pico de esta segunda tormenta. En esta fase se observa que el oleaje unimodal *sea* empieza siendo el dominante, transformándose en el final del temporal en oleaje *swell*.

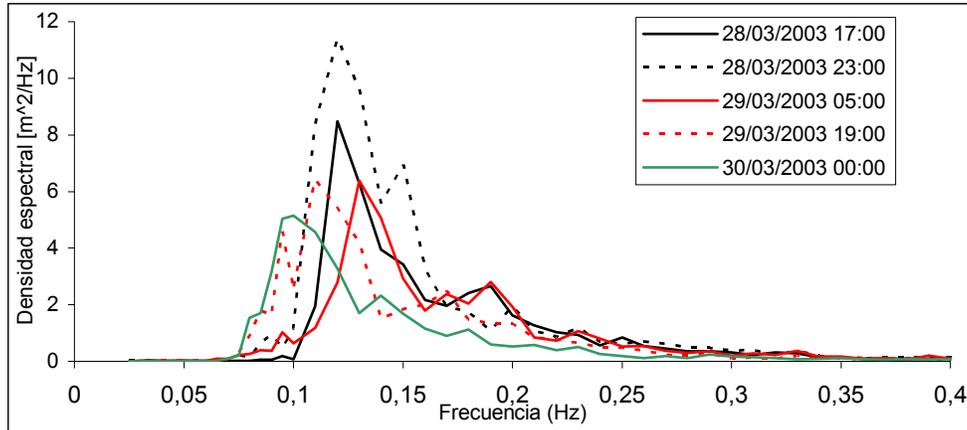
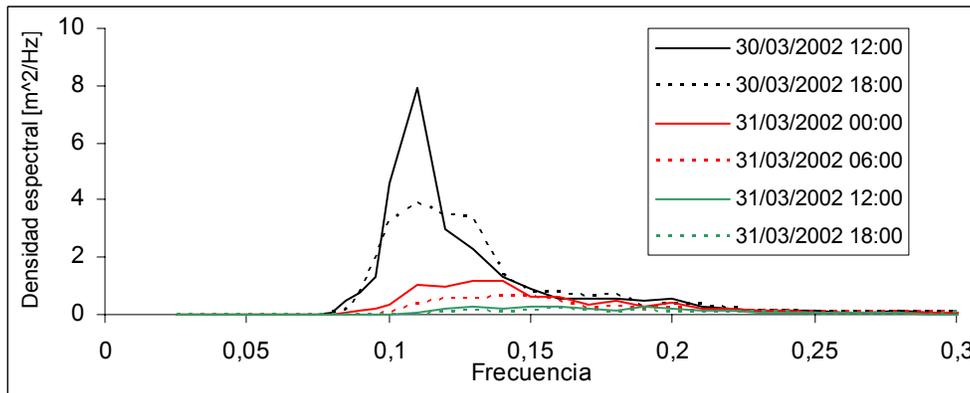


Fig. IV.20 - Muestra espectral del segundo subperiodo (Fuente: Elaboración propia)

En la figura IV.20 se observa como el oleaje *sea* continúa disminuyendo en frecuencia y aumentando en densidad energética. Después de llegar a su máxima densidad energética continuará disminuyendo tanto en frecuencia como en densidad espectral.

3. Desde el final del subperiodo anterior hasta las 10 horas del día 2 de abril. En este caso continúa el oleaje tipo *sea*.

a)



b)

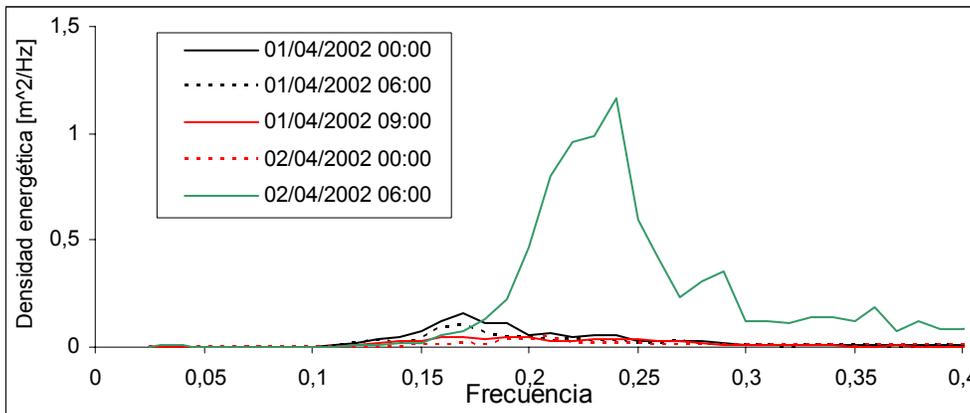


Fig. IV.21.a i IV.21.b - Muestras espectral del tercer subperiodo (Fuente: Elaboración propia)

En la figura IV.21.a se observa como el oleaje pierde densidad energética progresivamente situación que termina en la figura IV.21.b. En este misma figura se observa la aparición de un oleaje *sea* hacia el inicio del día 2/4.

- Desde las 11 horas del día 2 de abril hasta las 11 horas del día 4. En este subperiodo se produce el segundo pico del temporal.

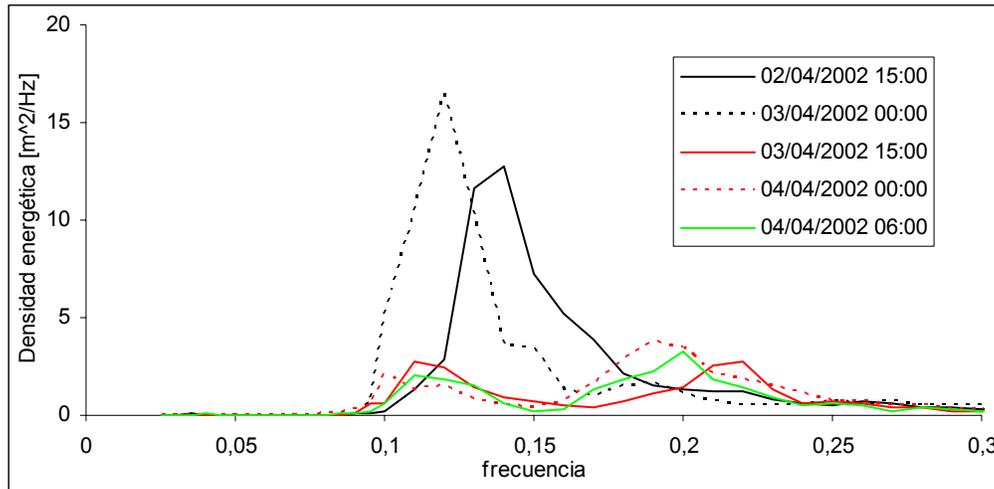


Fig. IV.22 - Muestra espectral del cuarto subperiodo (Fuente: Elaboración propia)

En la figura IV.22 se observa que el oleaje *sea* aumenta en densidad energética y disminuye en frecuencia pico convirtiéndose en un oleaje swell. Está clara la existencia del oleaje *sea* primero y después de swell, pero para poder cuando se produce el cambio sería necesario definir un criterio de separación (este enfoque se llega a cabo en el capítulo VI). Posteriormente se comprueba la aparición de un oleaje *sea*.

- Desde las 12 horas del día 4 hasta el final. En este último periodo el temporal mengua en intensidad con oleaje bimodal tipo swell y *sea*.

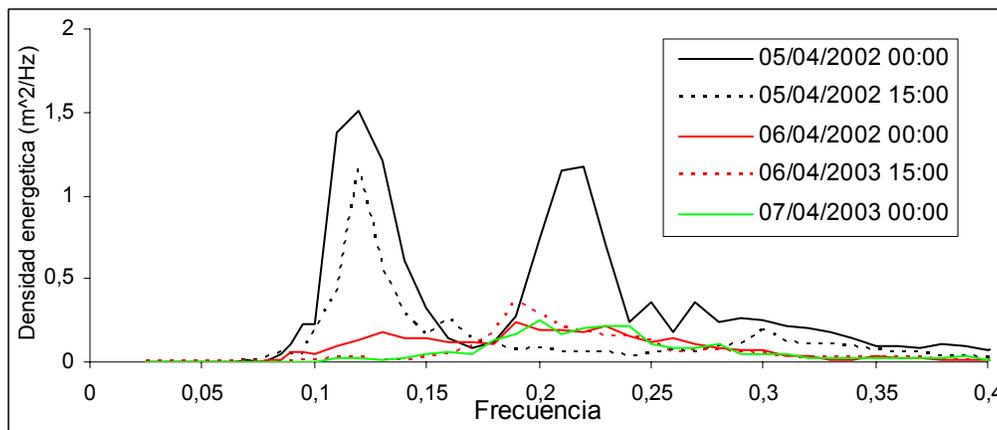


Fig. IV.23 - Muestra espectral del quinto subperiodo (Fuente: Elaboración propia)

### IV.2.2.2. Descripción espectral del primer pico

El primer pico del temporal comprenderá desde las 11:00 horas del día 28 de marzo del 2002 hasta las 12 horas del día 30 de abril del 2002. El análisis espectral va a ser análogo al realizado en la primera tormenta estudiada del noviembre del 2001. Tal y como sucedió en la primera tormenta estudiada existen diferentes registros de los cuales no se disponen datos de la boya o de la estación meteorológica.

Clase	Subclase	28 de marzo (desde 11:00 horas)	29 de marzo	30 de marzo (hasta 12:00 horas)	Número total de registros
<b>I</b>	I-1	5	8		<b>13</b>
	I-2		3	11	<b>14</b>
<b>II</b>	II-1				<b>0</b>
	II-2				<b>0</b>
	II-3				<b>0</b>
<b>III</b>					<b>0</b>
Total		5	11	11	<b>27</b>

Tabla IV.3 – Clasificación del oleaje para el primer pico de la tormenta

Como en el primer periodo estudiado, se observan diferentes archivos que presentan distorsiones:

En el día 28/3: desde las 11:00 horas hasta 20 horas a excepción de los puntos horarios de las 17:00 y 19:00 horas.

En el día 29/3: desde las 9:00 horas hasta las 18:00 horas, más los puntos horarios de las 21:00 y 22:00 horas.

Del conjunto de registros válidos escogidos, un total de 27 se observan dos clases de oleaje, I-1 y I-2. Este primer pico de la segunda tormenta se caracteriza por un oleaje tipo *sea* principalmente en la primera mitad y swell en la segunda mitad; la dirección del oleaje se puede observar en la figura IV.26.

La evolución sufrida por la densidad energética a lo largo de este primer pico del temporal considerado fue la que se observa en la figura IV.24. Nótese que la frecuencia pico es constante en el tramo final del periodo considerado, mientras que  $T_z$  (figura IV.25) tiene una tendencia ligeramente ascendente.

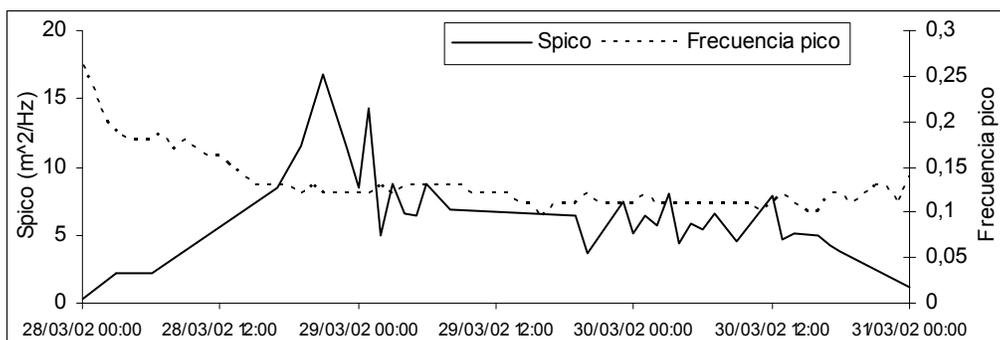


Fig. IV.24 – Evolución energética para la frecuencia pico (Fuente: Elaboración propia)

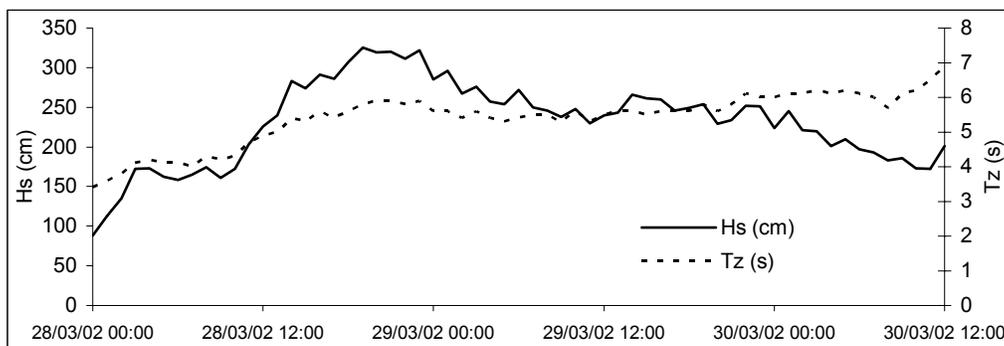


Fig. IV.25 – Evolución altura de ola significativa y periodo ( $T_z$ ) (Fuente: Elaboración propia)

El día **28 de marzo** empieza caracterizado por un fuerte viento de levante con valores que llegan hasta los 11 m/s que propicia la aparición de una zona de generación de olas. La intensidad del viento se mantiene a lo largo de todo el día, oscilando entre los 10 y los 13 m/s.

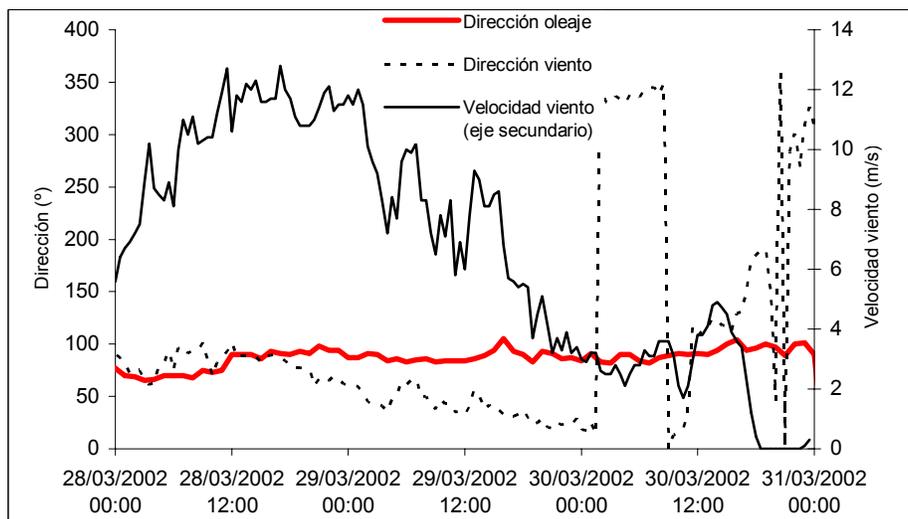


Fig. IV.26 – Evolución de la dirección del oleaje y del viento junto a la velocidad de este (Fuente: Elaboración propia)

El oleaje se mantiene moderadamente alineado con la dirección del viento hasta las 18 horas, momento a partir del cual se produce una progresiva variación de la dirección del viento, respecto a la dirección del oleaje que se mantiene constante dentro del intervalo entre los  $70^\circ$  y los  $90^\circ$ . El oleaje alcanza su máxima densidad energética espectral a las 21 horas (figura IV.24), decayendo a continuación consecuencia de que la velocidad del viento se mantiene fuerte pero la progresiva desviación de la dirección del viento produce que la transmisión de la energía disminuya.

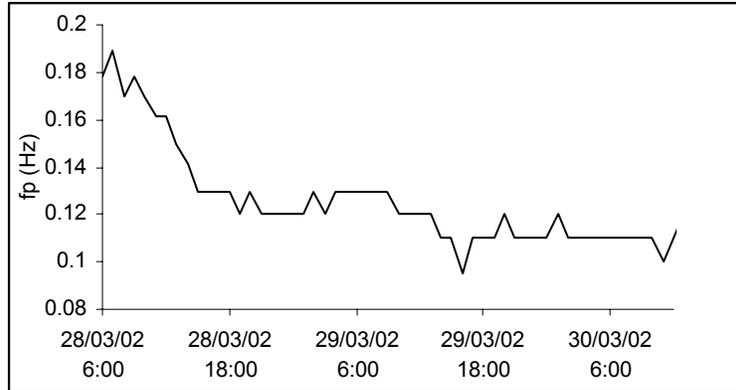


Fig. IV.27 – Evolución de la frecuencia pico a lo largo del primer pico (Fuente: Elaboración propia)

Debido a esta progresiva variación de la dirección, produce que la frecuencia pico se traslade de los valores más altos ( $f_p = 0.2$  Hz) hasta valores más bajos debido a que el viento no puede sostener la energía para las frecuencias más altas, sin embargo la estructura de oleaje *sea* se mantiene.

El día **29 de marzo** continúa la tendencia de desviación del viento respecto del oleaje. El oleaje responde lentamente al cambio de dirección del viento. El oleaje continúa con una dirección entre los  $60^\circ$  y los  $100^\circ$ , más o menos constante.

La frecuencia pico continúa descendiendo hasta valores alrededor de  $f_p = 0.11$  Hz, junto a la velocidad del viento que a partir de las 18 horas ya se encuentra con valores inferiores a 6 m/s. Estas situaciones producen que el oleaje que hasta el momento había sido *sea* se acabe transformando en un oleaje swell. La densidad energética se mantiene estable entre los 8 y los  $4.5 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

Por otro lado, la tendencia energética para el día **30 de marzo** es de continuar decreciendo. La dirección del viento continúa desfasada del oleaje y su velocidad descendiendo más. El viento sufre variaciones en la dirección pasando de ser viento de componente norte a viento de componente este.

La frecuencia pico continúa situada alrededor de  $f_p = 0.11$  Hz, mientras que la dirección del oleaje continúa entre los  $80^\circ$  y los  $94^\circ$ .

### IV.2.2.3. Descripción espectral del segundo pico

El segundo periodo del temporal comprenderá el estudio entre las 11:00 horas del día 2 de marzo del 2002 hasta las 11 horas del día 4 de abril. La clasificación espectral para este caso es la que se observa en la tabla IV.4.

Clase	Subclase	2 de marzo (desde 11:00)	3 de marzo	4 de marzo (hasta 11:00 horas)	Número total de registros
<b>I</b>	I-1	5			<b>5</b>
	I-2				
<b>II</b>	II-1	2	18	8	<b>28</b>
	II-2				
	II-3				
<b>III</b>					
Total		7	18	8	<b>33</b>

Tabla IV.4 – Clasificación del oleaje para el segundo pico de la tormenta

Los diferentes archivos que presentan distorsiones en este caso son:

En el día 2/4: 12 horas, 13 horas, 14 horas, 16 horas, 17 horas, 18 horas, 20 horas

En el día 3/4: 9 horas, 10 horas, 11 horas, 12 horas, 13 horas, 14 horas, 17 horas

En el día 4/4: 7 horas, 8 horas, 9 horas, 10 horas

En primer lugar destacar la presencia de oleaje *sea* (I-1) en el inicio del periodo considerado y, en segundo, la importancia del oleaje II-1.

La evolución sufrida por la densidad energética a lo largo de este segundo pico del temporal considerado se observa en la figura IV.28.

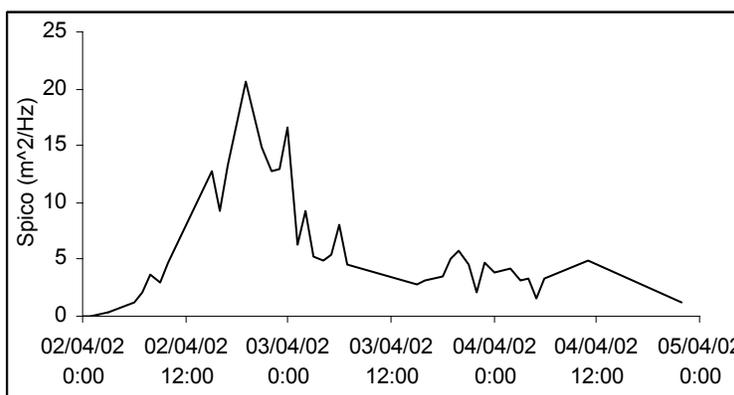


Fig. IV.28 – Evolución energética para la frecuencia pico (Fuente: Elaboración propia)

Estableciendo una comparativa entre los picos de la tormenta, se observa que el primer pico del temporal tiene una menor densidad de energía pico aunque su duración considerada y su altura de ola significativa máxima sean mayores que para el segundo pico.

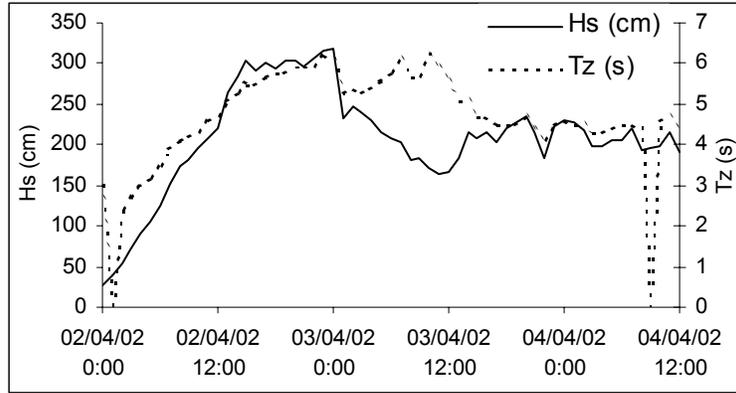


Fig. IV.29 – Evolución de  $H_s$  y el periodo ( $T_z$ ) (Fuente: Elaboración propia)

En el periodo de inicio del segundo pico del temporal se considera una tendencia unimodal con un oleaje *sea*. El día **2 de abril** empieza caracterizado por un viento creciente del noreste (gregal) con valores que llegan hasta los 13.7 m/s, hecho que vuelve a incrementar el oleaje. La intensidad del viento decrece progresivamente a lo largo de todo el día, después del pico.

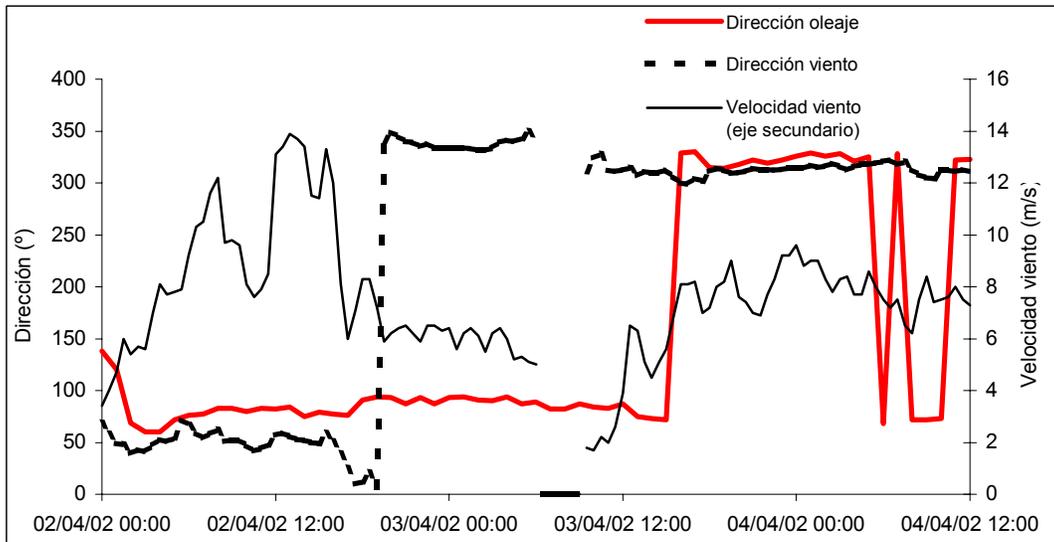


Fig. IV.30 – Evolución de la dirección del oleaje y velocidad y dirección del viento (Fuente: Elaboración propia)

Por otro lado, la dirección del oleaje difiere con la del viento ya que el primero viene del intervalo de direcciones situado entre los  $75^\circ$  y los  $83^\circ$ . Dada esta diferencia, es importante la cantidad de energía que deja de ceder el viento al oleaje existente. Esta diferencia entre las dos direcciones se va haciendo cada vez más grande de forma progresiva. A partir de las 16 horas la dirección del viento inicia un giro más pronunciado, pasando progresivamente de ser un viento de gregal a viento de componente nor-noroeste (entre tramuntana y mestral), aunque su velocidad desciende ligeramente. Debido a este cambio marcado hace que el máximo de la densidad energética se sitúe a las 19 horas y que a partir de ese momento inicie un descenso. Nótese que el oleaje tarda 24 horas en responder para el cambio de dirección del viento, ya que a partir de las 16 horas del día 3/4/02 el oleaje se vuelve a alinear con la dirección del viento.

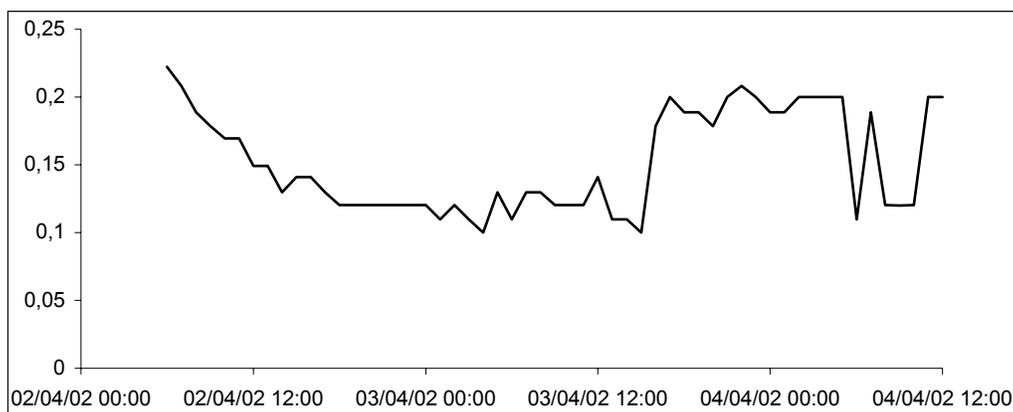


Fig. IV.31 – Evolución de la frecuencia pico a lo largo del primer pico (Fuente: Elaboración propia)

La frecuencia pico desciende desde valores superiores a 0,2 Hz, hasta situarlos alrededor de 0,12 Hz. En los últimos registros del día, el giro producido por el viento produce la aparición de un oleaje *sea*, mientras que el anterior se puede considerar que está fuera de su zona de generación.

El día **3 de abril** continúa con la tendencia del día anterior tanto en las direcciones del viento y del oleaje (situado entre los 80° y los 90°), y en la velocidad del viento, descendente paulatinamente. El viento alrededor de las 10 horas pasa a ser de mestrall completamente.

El viento creó en las últimas horas del día anterior un oleaje que continúa desarrollándose mientras que el que dominó durante todo el día anterior decrece (esta situación puede verse en el cambio de frecuencia pico de la figura IV.31). La dirección del oleaje pico se mantiene constante, entre los 80° y 90°, hasta las 15 horas momento en el cual el oleaje pico adquiere una dirección paralela a la del viento debido a que el oleaje *sea* pasa a ser el dominante.

Este cambio produce que la frecuencia del oleaje también experimente un cambio, dado que el oleaje dominante en primer lugar tenía unas frecuencias bajas (era swell). El cambio se produce paralelo al cambio de la dirección del viento, debido que pasa a ser dominante oleaje *sea* y recupera valores de frecuencia altos alrededor de 0,2 Hz.

Es importante comentar la variación que produce en el espectro direccional el cambio de dirección del viento junto a la creación del nuevo oleaje *sea*. Esta situación se puede observar en la comparativa de las figuras IV.32 y IV.33.

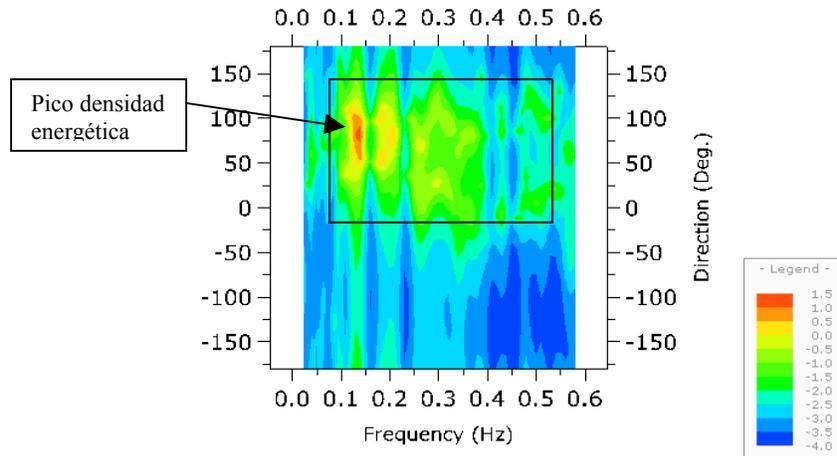


Fig. IV.32 – Espectro direccional del registro de las 15:00 horas del 2/4/02 (Fuente: Elaboración propia)

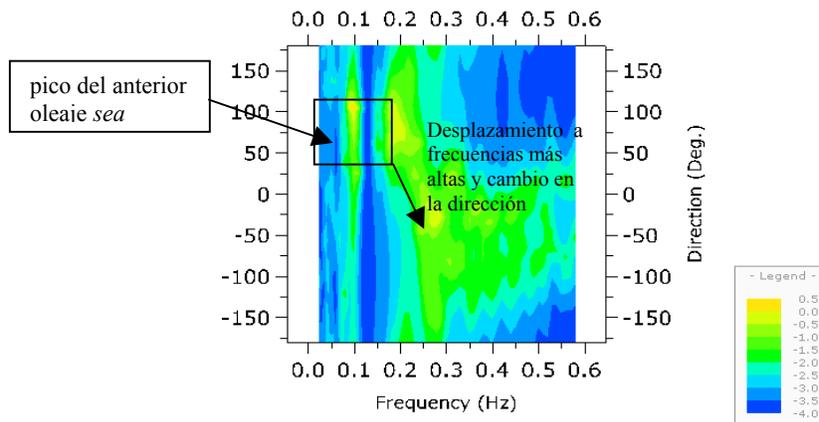


Fig. IV.33 – Espectro direccional del registro de las 4:00 del 3/4/02 (Fuente: Elaboración propia)

En el gráfico IV.32 se observa la estructura del espectro direccional de un oleaje típicamente *sea*, donde la energía se distribuye, a partir de una frecuencia dos veces la frecuencia pico, aproximadamente de forma simétrica en la dirección 79° a lo largo de todas las frecuencias.

En cambio, en el gráfico IV.33 se observa que la estructura del espectro ha sufrido una variación debido a que la variación en la dirección del viento traslada la energía en las frecuencias más altas hacia la nueva dirección del viento.

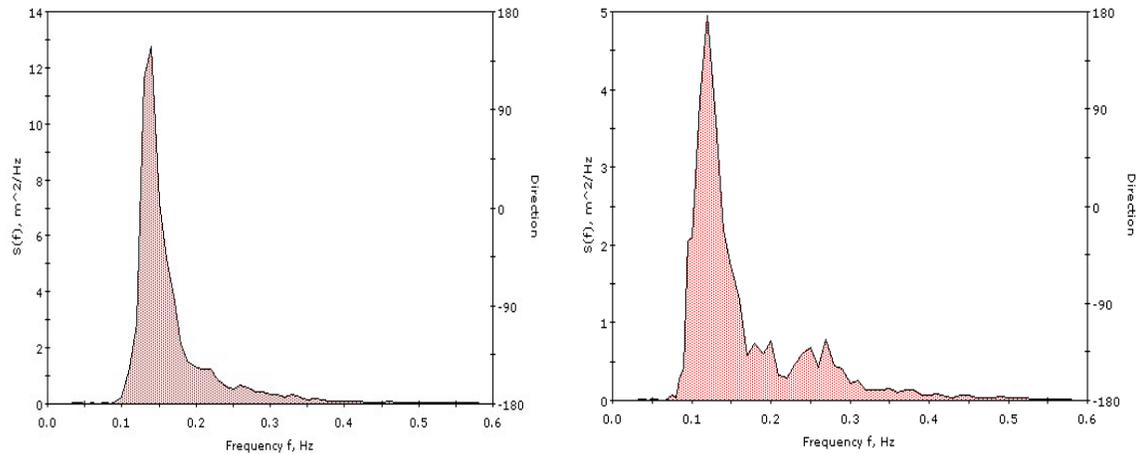


Fig. IV.34 y IV.35 – Espectros escalares de las 15:00 horas del 2/4/02 y del registro de las 4:00 del 3/4/02, respectivamente (Fuente: Elaboración propia)

Si contrastamos los espectros de frecuencia escalares de los respectivos registros no se puede apreciar el cambio de dirección y ambos registros presentan una estructura más o menos similar (aunque la energía pico es superior en el primer registro considerado). Por otro lado es necesario observar que la densidad de energía espectral de las frecuencias altas que se están tratando es poca comparada con la aportación de la región alrededor del pico pudiendo parecer al principio que este tipo de dispersión tenga poco impacto para las aplicaciones ingenieriles, pero no es así; las olas con frecuencias más altas afectan a las olas más grandes debido a la tensión de transmisión de energía del viento a la ola y también por la interacción ola-ola. Su interés está relacionado con la modelización correcta del oleaje. Como conclusión, comentar que se ha presentado un ejemplo de la importancia del espectro direccional frente al escalar, debido que este fenómeno sólo se puede observar en el primer tipo de espectros.

El día **4 de abril** empieza con la tendencia del día anterior respecto al oleaje y al viento. Domina generalmente el oleaje *sea* alineado con la dirección del viento aunque en algún registro el oleaje swell es el dominante. La velocidad se mantiene superior a los 6 m/s. Se produce el descenso de intensidad de la energía de la tormenta, y hacia las 12:00 horas se considera el fin del temporal.