

Análisis de la energía del oleaje en las costas españolas (*)

Por CESAR VIDAL PASCUAL
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El análisis de las disponibilidades es el primer paso en el estudio del aprovechamiento de la energía del oleaje. En el artículo se hace una evaluación de la energía del oleaje en las costas españolas, determinándose los regímenes temporales en los puntos en los que se dispone de datos suficientes, analizándose las duraciones de niveles de potencia determinada y estudiándose la energía del oleaje por direcciones.

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

La energía solar es el origen indirecto del oleaje. Las diferencias de presión atmosférica, debidas al calentamiento irregular de la superficie terrestre son el motor de los vientos, los cuales transfieren, en virtud de ciertos mecanismos, (13), parte de su energía a la superficie del agua sobre la que circulan.

El análisis de las disponibilidades es el primer paso en el estudio del aprovechamiento de la energía del oleaje. Los países europeos atlánticos se han planteado seriamente el estudio del oleaje en sus áreas marítimas respectivas, por lo que disponen en la actualidad de series de datos de oleaje extensas y homogéneas que les han permitido determinar sus disponibilidades de energía: (1) y (2), en el Reino Unido; (3), en Suecia; (4), en Noruega. En el resto del mundo, otros países como Canadá, (5); USA (6); África del Sur (7); Japón y Australia han efectuado trabajos en este campo.

Los objetivos de este trabajo se pueden concretar en:

1. Evaluación de la energía del oleaje que aborda las costas españolas.
2. Determinación de los regimenes temporales en potencias en los puntos en que se dispone de datos suficientes.
3. Análisis de las duraciones de niveles de potencia determinada.
4. Estudio de la energía del oleaje por direcciones.

En el organigrama de la figura 1 se muestra la metodología de trabajo seguida.

Este artículo resume una parte de la investigación realizada por el Departamento de Puertos y Obras Marítimas sobre el tema del aprovechamiento de la energía del oleaje. En otros dos artículos se tratará la historia de los generadores de energía del oleaje y se explicará el comportamiento del sistema seleccionado.

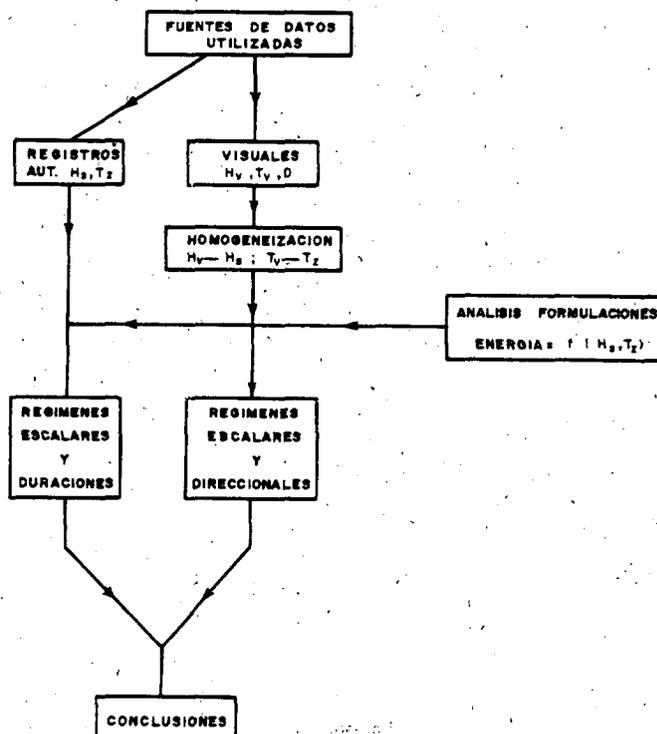


Figura 1.—Organigrama de trabajo.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 28 de abril de 1986.

2. FUENTES DE DATOS

Se han utilizado básicamente dos tipos de datos:

- a) Datos instrumentales.
- c) Datos de observaciones visuales.

Los datos instrumentales aportan, aparte su precisión, la información sobre la distribución en el tiempo de los parámetros que definen el oleaje en el punto de registro (en general el desplazamiento vertical de la superficie libre). Los datos visuales permiten estimar la distribución direccional del oleaje.

En la figura 2 se muestra la situación de los puntos de registro automático, duración y profundidad en el punto de medida de las fuentes de datos de registro automático. También se delimitan las áreas marítimas utilizadas de la fuente de datos visuales, (8).

En general, se definen estados de mar de tres horas de duración que se caracterizan por los parámetros estadísticos «altura significativa» $H_{s,}$ o $H_{1/3,}$ y «período medio de paso ascendente por cero», $T_z,$ calculados por métodos espectrales o por Tucker-Draper, (9), a partir de

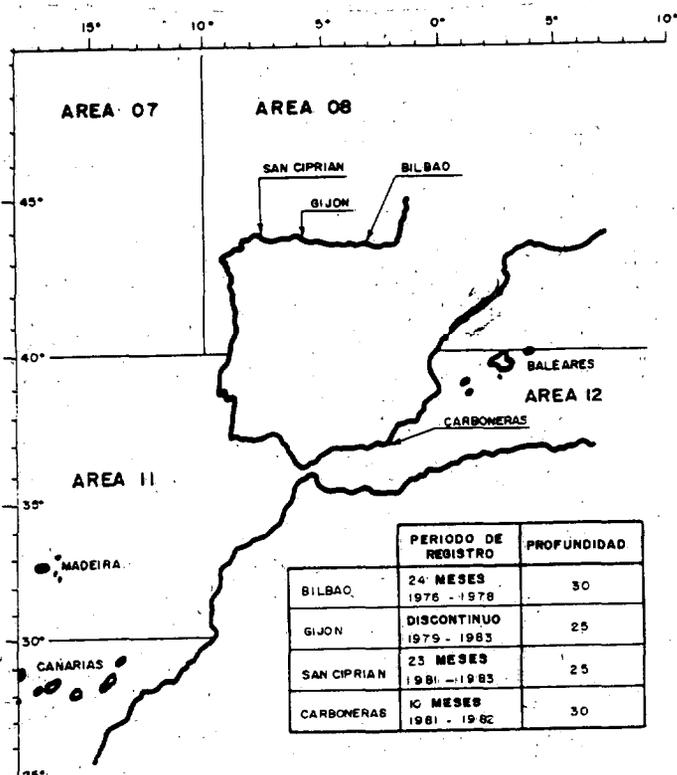


Figura 2. - Fuentes de datos.

registros magnéticos o en papel continuo de unos 10 minutos de duración dentro de cada estado de mar.

En el caso de Bilbao, Gijón y San Ciprián, se han obtenido los datos ya procesados. Los datos de Carboneras, recibidos en papel continuo, se han procesado por Tucker-Draper.

Los datos de Gijón presentan numerosas interrupciones, por lo que sólo se han utilizado como comprobación de la pequeña variación de las características del oleaje a lo largo del Cantábrico.

En lo que se refiere a los datos visuales, se han empleado las tablas correspondientes al área 8 para el Cantábrico, área 7 para Galicia, área 11 para Cádiz y San Vicente y área 12 para las costas Mediterráneas. Como veremos más adelante, en el análisis de la energía en las áreas costeras, se eliminan los sectores correspondientes a las costas cercanas.

3. FORMULACIONES EMPLEADAS

3.1 Cálculo del flujo medio de energía en un estado de mar representado por H_s y T_z

Si R es una región de un fluido rodeada por una superficie S, la energía E contenida en R será la suma de la energía cinética y de la energía potencial de las partículas de agua contenidas en R:

$$E = E_c + E_p$$

Se define FLUJO DE ENERGIA a través de una superficie S, a la variación total de E respecto al tiempo en el recinto R:

$$F = \left(\frac{dE}{dt} \right) R$$

En el caso de un movimiento periódico, como puede ser una onda de período T, es conveniente definir el FLUJO MEDIO DE ENERGIA como la promediación en un período de F:

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \left(\frac{dE}{dt} \right) R dt$$

Estas ecuaciones se pueden desarrollar para

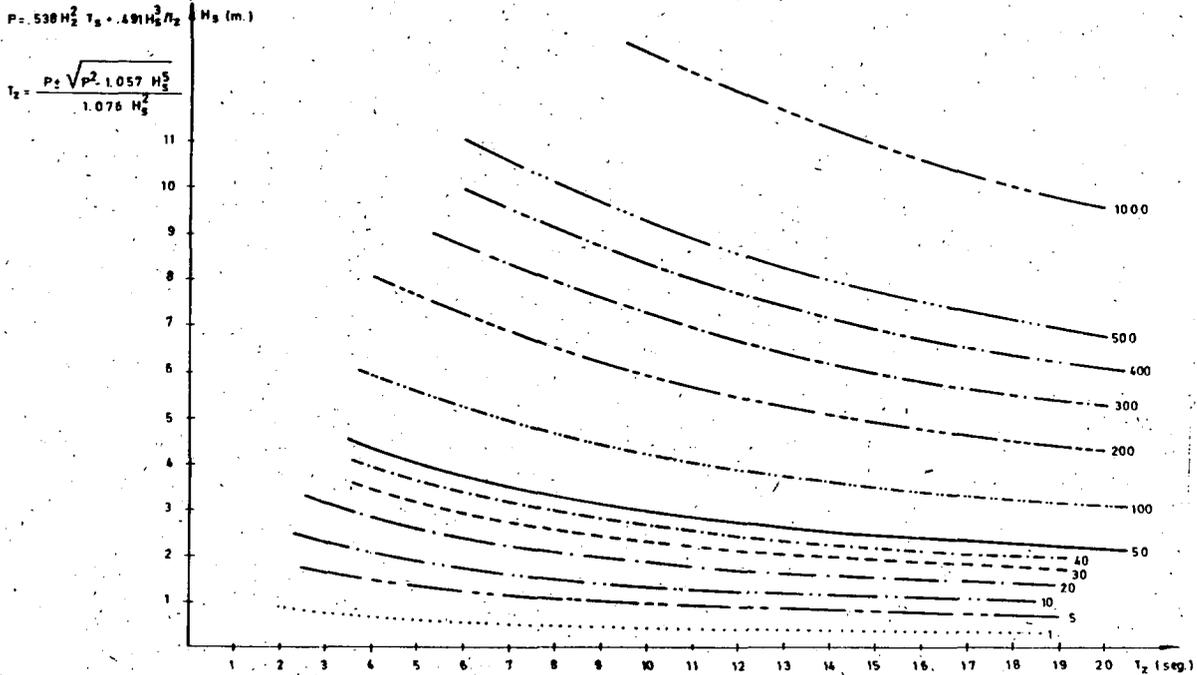


Figura 3.—Curvas de igual potencia para estados de mar. Potencia en Kw/m.

el caso de teoría potencial y diferentes recintos R. En el caso de utilizar la Strem Function V, (10), y en profundidades indefinidas, se obtiene

$$\bar{F} = 1000 H^2 R + 1046 H^3 / T \quad \text{w/m}$$

Supuesto un estado de mar formado por N ondas lineales unidireccionales consecutivas, la energía que atraviesa un plano vertical paralelo a las crestas, por unidad de anchura es:

$$E_T = \sum_1^N F_i T_i \quad \text{w/m}$$

En el supuesto de oleaje desarrollado, asociado a un espectro estrecho, Nath (6), obtiene para la energía total:

$$E_T = 538 H_s^2 T_z^2 + 491 H_s^3 \quad \text{wseg/m}$$

y para el flujo medio de energía en el estado de mar, dividiendo por T_z :

$$P = 538 H_s^2 T_z + 491 H_s^3 / T_z \quad \text{w/m}$$

En la figura 3 se representan en ejes $H_s - T_z$ las curvas de igual potencia media que se obtienen a partir de la expresión (1).

ESQUEMA GENERAL

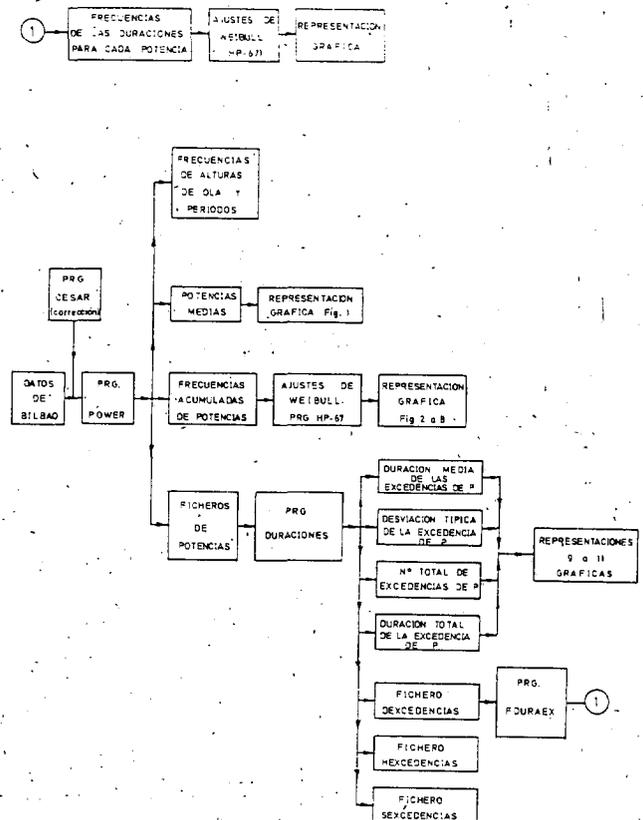


Figura 4.—Esquema general del proceso de los datos de la boya de Bilbao.

BILBAO 1976 - 1978

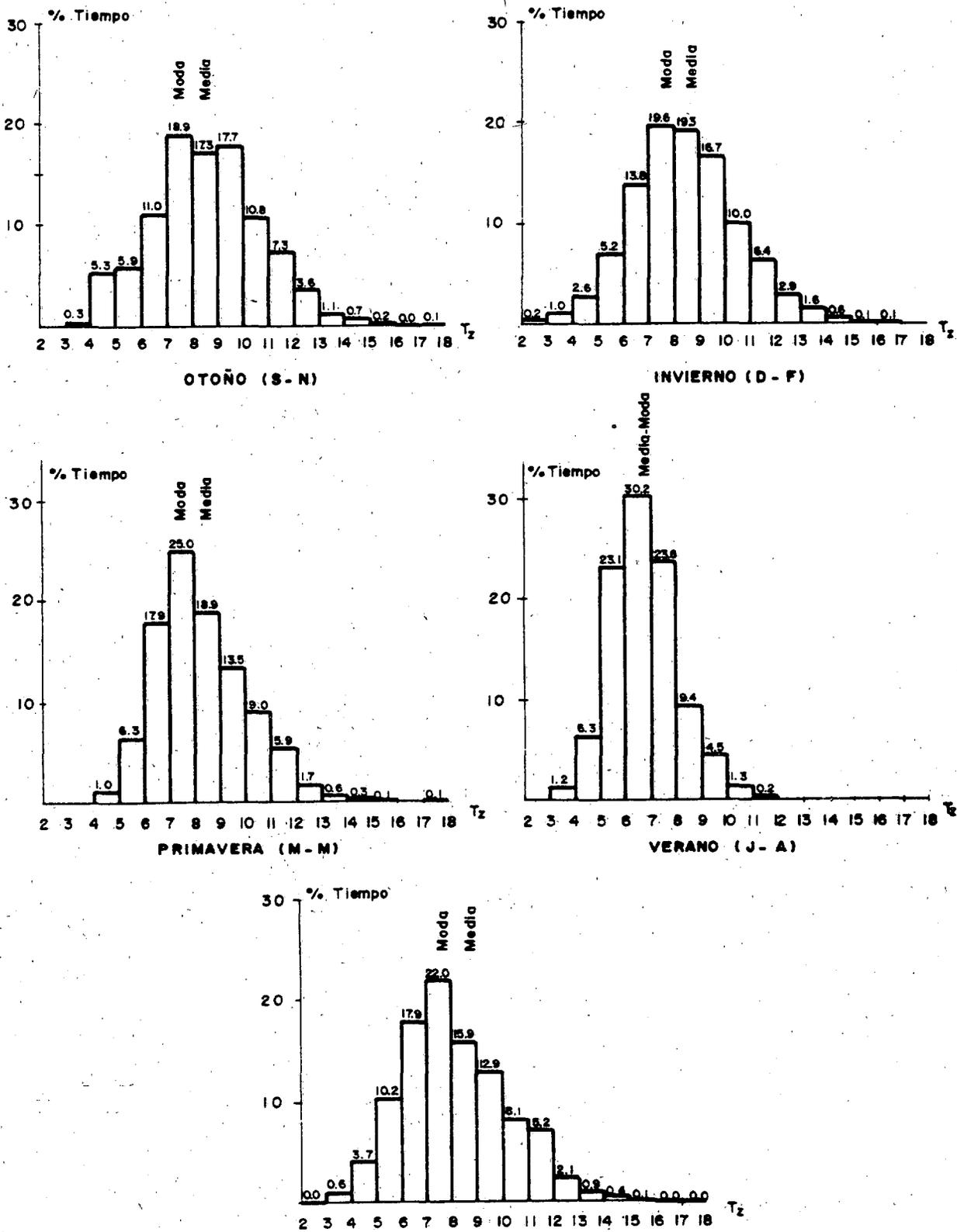


Figura 5.—Frecuencias estacional y anual de periodos medios de paso por cero.

3.2 Relación entre los parámetros H_s y T_z y los visuales H_v , T_v

y de Hogben y Pumb, 1967

$$T_v = 1.23 T_z$$

Con objeto de homogeneizar los datos visuales, se han utilizado las relaciones de Jardine, (11)

$$H_v = 0.022 H_s^2 + 0.78 H_s + 0.83$$

4. PROCESO DE DATOS Y RESULTADOS

4.1. Proceso de los datos de registro automático

En la figura n.º 4 se esquematiza el proceso de los datos medidos por la boya del Morro del Superpuerto de Bilbao.

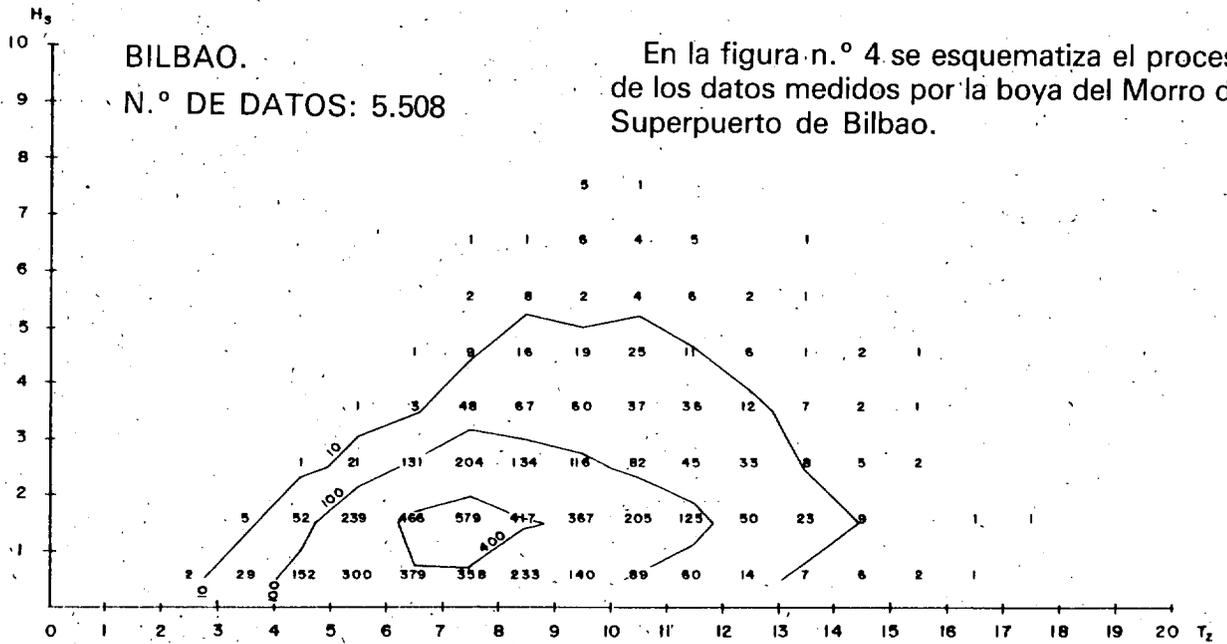


Figura 6.—Frecuencia conjunta H_s/T_z .

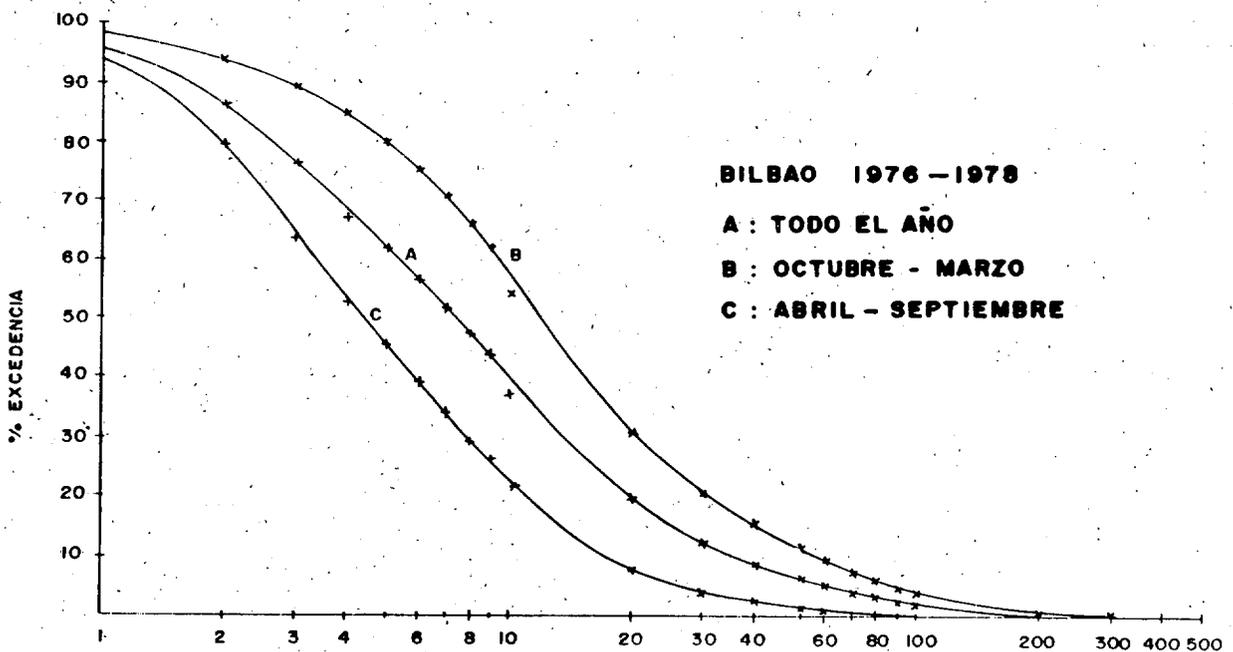


Figura 7.—Frecuencias de excedencias de una potencia dada.

En primer lugar, se calcula la potencia media de cada estado de mar, aplicando la expresión (1) a los datos. La serie de resultados, P_i , constituye la curva de estados de mar en potencias. Con las curvas de estados de mar H_s y T_z se determinan las frecuencias $Fr(H_s \leq H_{s0})$, $Fr(T_z \leq T_{z0})$ y conjunta $Fr(H_s \leq H_{s0}, T_z \leq T_{z0})$, figuras 5 y 6. Como puede observarse en la figura 5, los períodos medios más frecuentes en el año son los de 7-8 segundos, y la media se encuentra en los 8-9 segundos. En invierno son más frecuentes los períodos altos, asociados a los temporales, mientras en verano se concentran en el rango 5-8 segundos. En la figura 6 se indica el número de estados de mar en cada intervalo $H_s - T_z$ considerado. El recinto más frecuente es el $1 < H_s < 2$ m, $7 < T < 8$ segundos con algo más de 10 por 100 de los datos. La gran abundancia de Swells (oleajes regulares, generados a gran distancia), queda reflejada en el hecho de que los períodos más altos no corresponden a los mayores temporales, sino a la banda $1 < H_s < 3$ m, debido al filtrado de las frecuencias altas que se produce en la propagación del oleaje.

De la curva de estados de mar en potencias se obtienen las frecuencias $Fr(P \leq P_0)$, mensua-

BILBAO

ENERGIA TOTAL AÑO 1976-77: 110,689 Mwh/m

ENERGIA TOTAL AÑO 1977-78: 173,886 Mwh/m

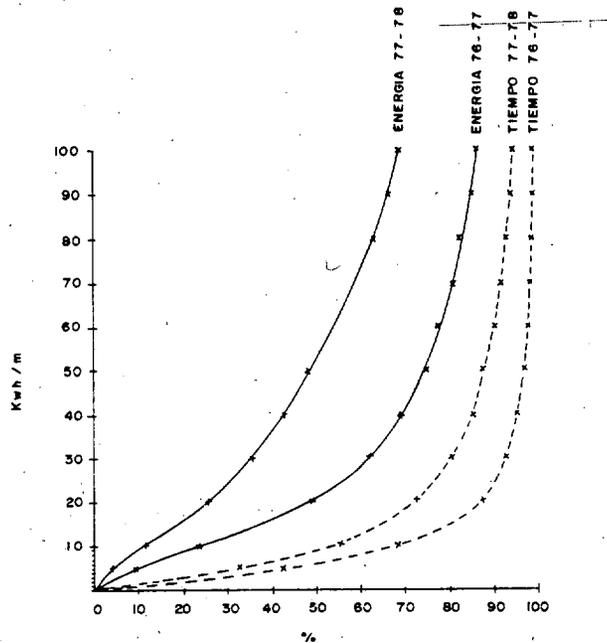


Figura 8. — % de la energía y del tiempo por debajo de un nivel de potencia determinado.

BILBAO AÑOS 1976 - 1978

ENERGIA TOTAL = 142.35 MWh/metro/año

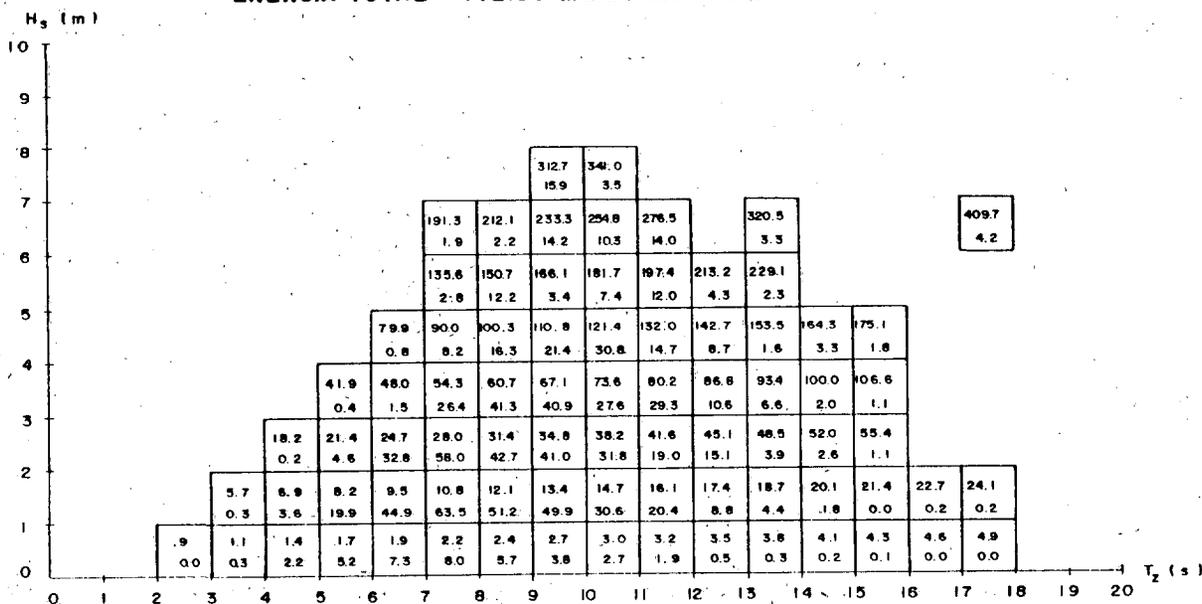


Figura 9. — Potencia asignada a cada recinto $H_s - T_z$ (N. superior en Kw/m) y % de la energía total existente en cada recinto (N.º inferior).

les, estacionales y anuales. A partir de ellas se determinan:

a) Porcentaje del tiempo en que la potencia excede un valor determinado, figura 7, distinguiéndose las variaciones estacionales. Por ejemplo, el 50 por 100 del tiempo se exceden los 4,5 Kw/m en el período abril-septiembre y los 11 Kw/m en el período octubre-marzo.

b) Porcentaje de la energía y del tiempo totales por debajo de una potencia determinada, figura 8. Por ejemplo, en el año 76-77, el 70 por 100 de la energía total se obtiene con estados de mar de potencias inferiores a los 40 kw/m. Sin embargo, en el 77-78, con mayor número de temporales, esta cifra es superior a los 100 Kw/m.

c) Distribución de la energía en recintos $H_{s1} < H_s < H_{s2}$, $T_{z1} < T_z < T_{z2}$, figura 9. El recinto con más energía es el $1 < H_s < 2$ m, $7 < T_z < 8$ segundos. Las distribuciones marginales se representan en la figura 10. La banda de períodos con mayor energía es la 9-10 segundos.

Este proceso se ha seguido con los datos de Bilbao y San Ciprián. De los datos de Carbo-neras sólo se han obtenido las potencias medias mensuales, que se comparan en la figura 11 con las de Bilbao y San Ciprián. Se puede observar la diferencia en un orden de magnitud entre los datos de Bilbao y San Ciprián (Potencia

media anual 16 y 14 Kw/m) muy similares y los de Carbo-neras, 1,8 Kw/m. Las diferencias estacionales en el Cantábrico son notorias, con un factor 10 entre la máxima y la mínima media mensual. Entre los meses invernales, no es raro factores de 3 entre potencias medias de meses consecutivos.

En el caso de los datos de Bilbao, se ha efectuado además un estudio de las duraciones de las excedencias de una potencia dada en la curva de estados de mar en potencias. Se han determinado la duración media de las excedencias, figura 12, número total de excedencias, figura 13, y duración total de las excedencias, figura 14. Se puede ver cómo los 10 Kw/m se superan alrededor de 5000 h al año. La potencia media, de 16 Kw/m, se supera unas 3000 h, alre-

BILBAO AGOSTO 1976 - JUNIO 1978

ENERGÍA TOTAL : 142.35 Mwh/metro/año

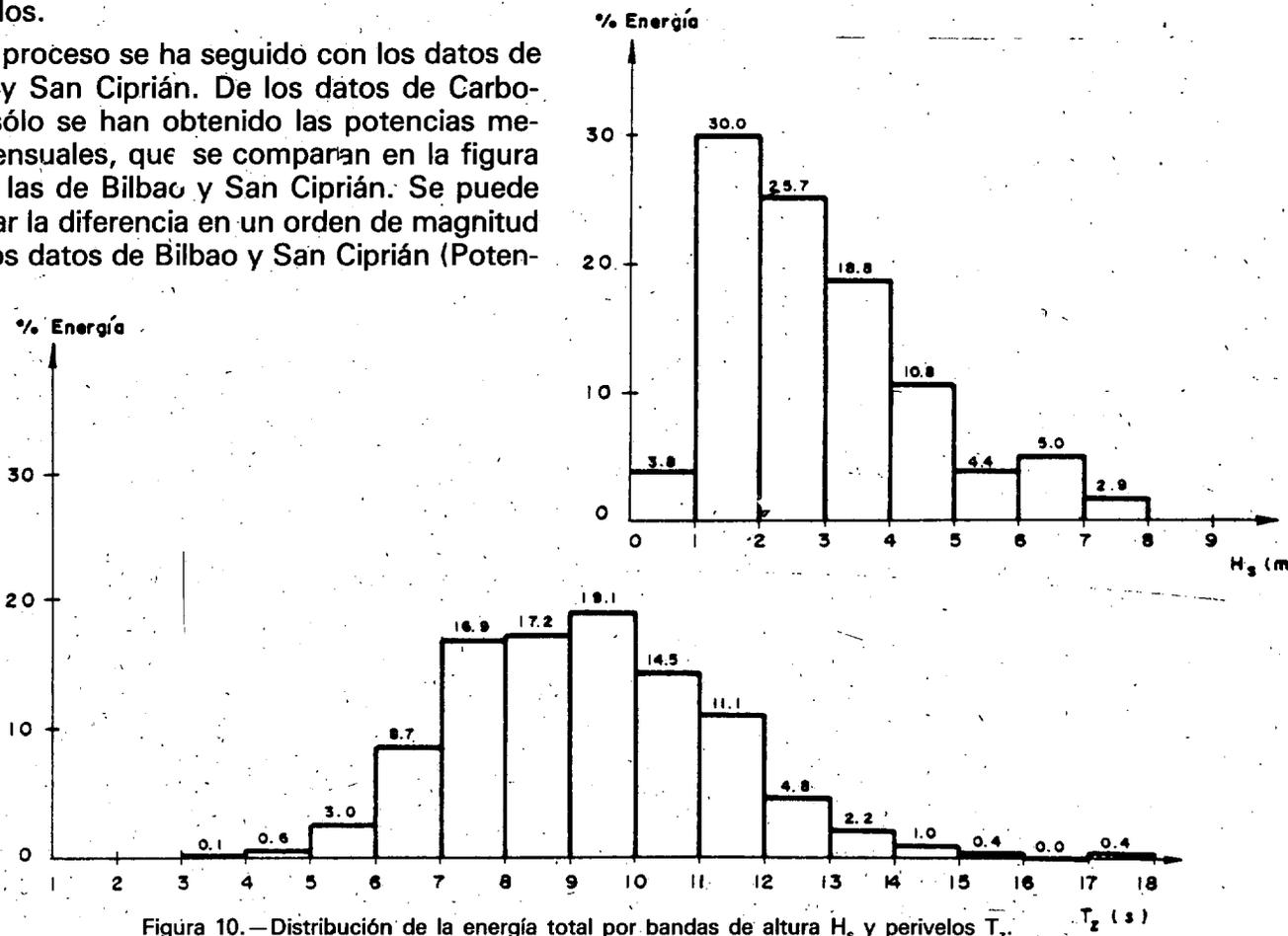


Figura 10.—Distribución de la energía total por bandas de altura H_s y períodos T_z .

dedor de 1/3 del período anual. El mayor número de excedencias se produce en el rango 7-10 Kw/m con alrededor de 170 excedencias anuales.

4.2. Proceso de los datos visuales

En la figura n.º 15 se esquematiza el proceso de los datos visuales. Para cada una de las tablas (estación, dirección y área), se calculan las distribuciones de H_s , T_z , y P , el porcentaje de energía en cada recinto $H_s - T_z$ y la distribución de energía por direcciones. Como resultados se pueden destacar:

a) Direcciones dominante y reinante en alta mar de las distintas áreas:

Area	Reinante	% Tiempo
Finisterre	Oeste	16.55
Cantábrico	Oeste	15.18
S. Vicente	Oeste	12.63
Mediterráneo	OON	18.44

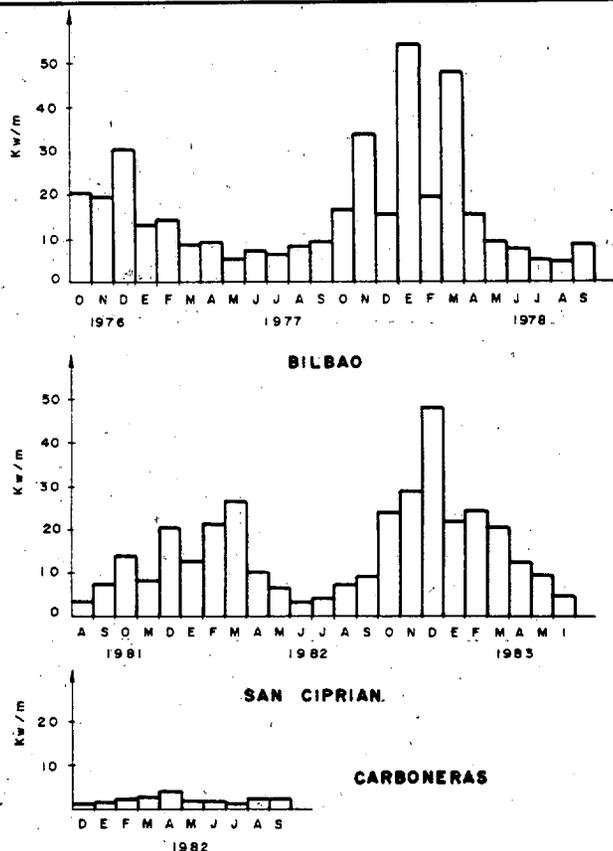


Figura 11.—Potencias medias mensuales.

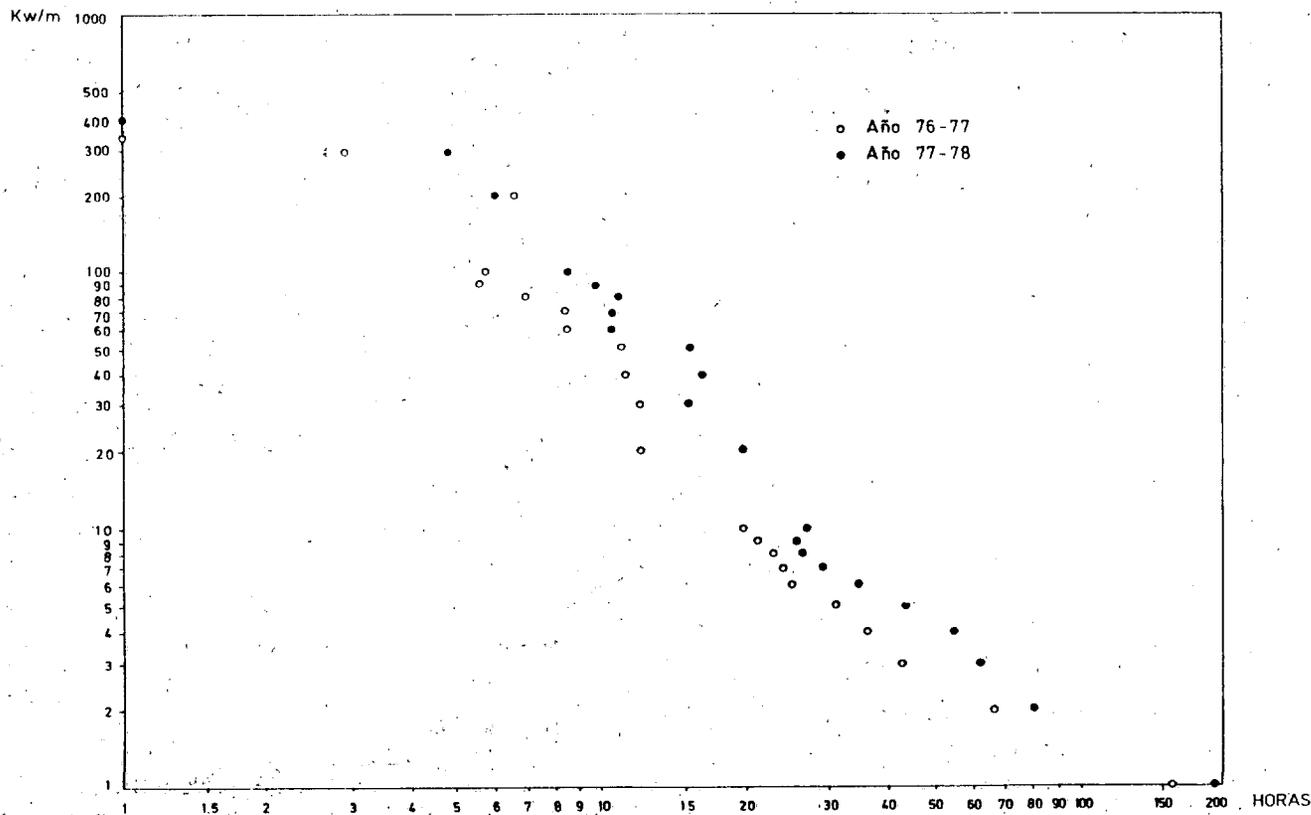


Figura 12.—Duración media de las excedencias: Años 1976-77 y 1977-78.

ANÁLISIS DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE EN LAS COSTAS ESPAÑOLAS

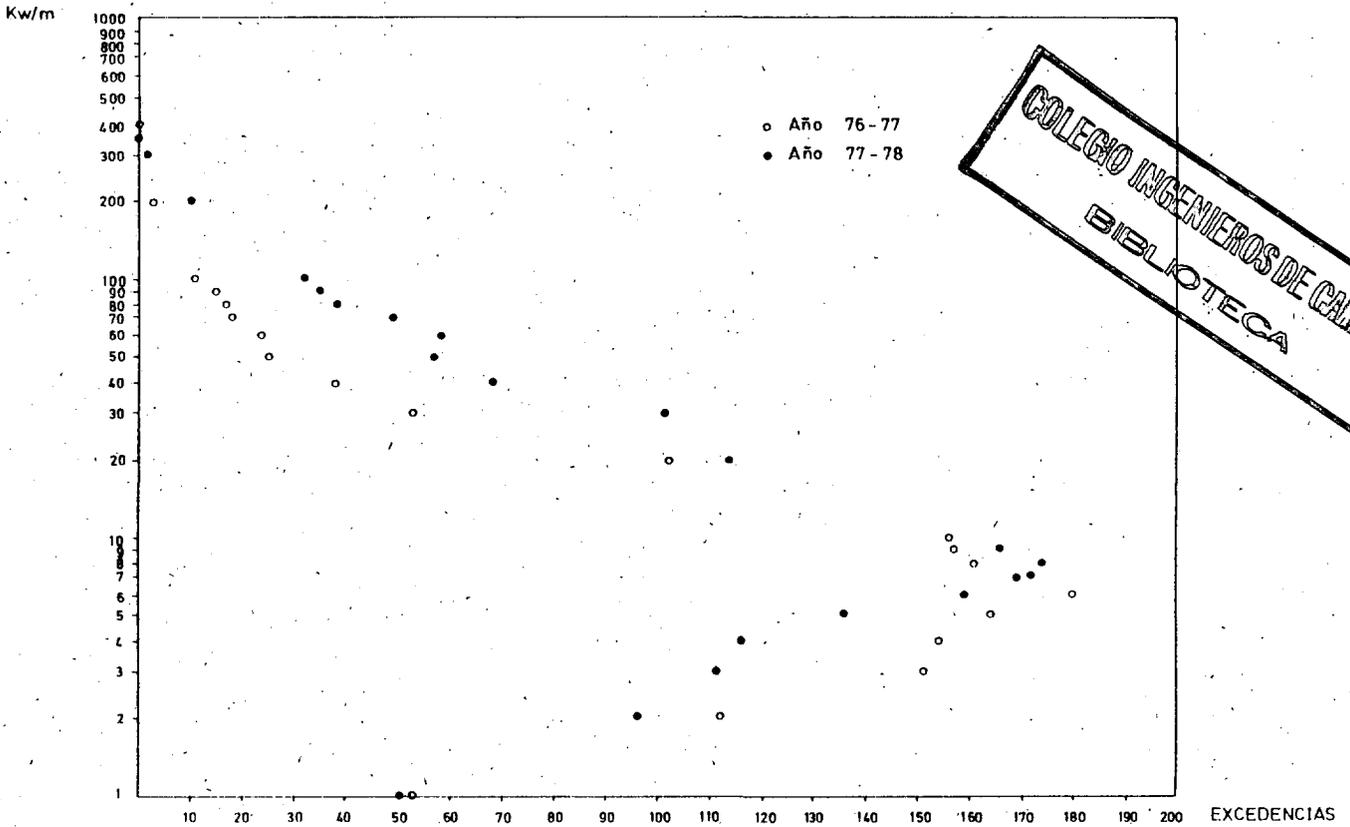


Figura 13.—Número de excedencias: Años 1976-77 y 1977-78.

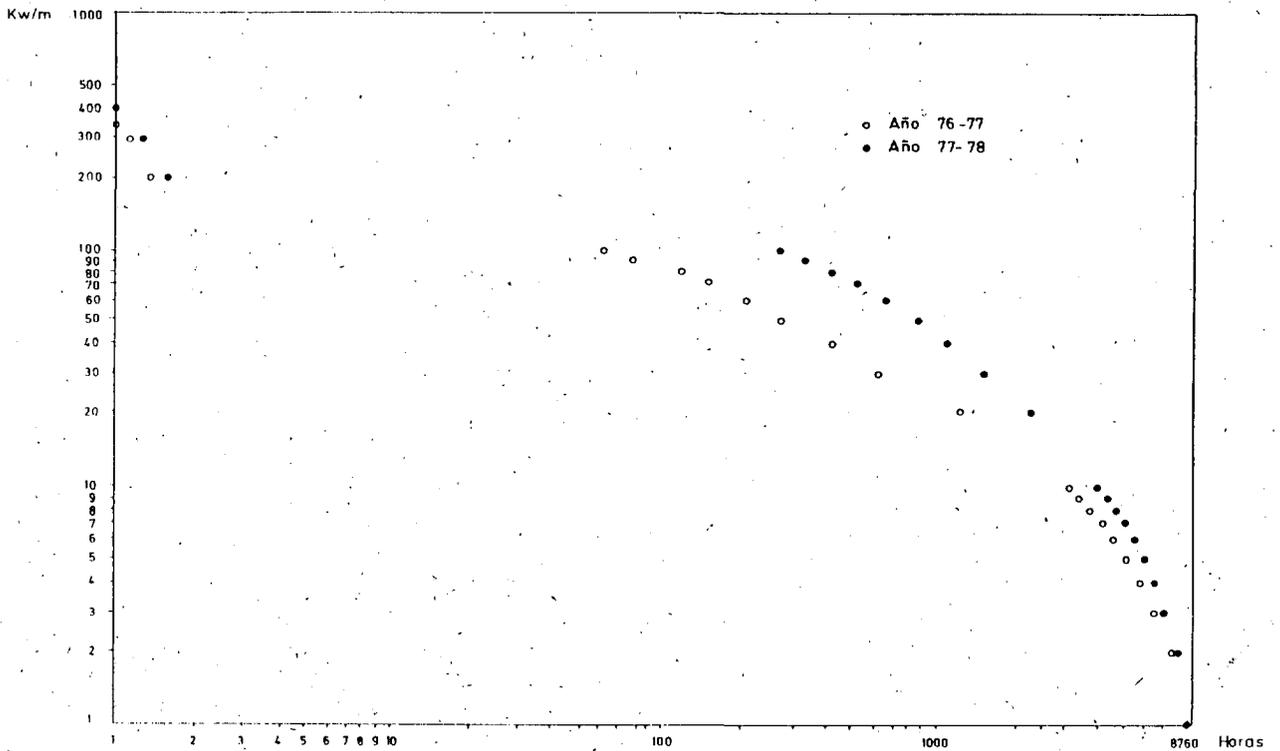


Figura 14.—Duración de las excedencias: Años 1976-77 y 1977-78.

ANÁLISIS DE LA ENERGIA DEL OLAJE EN LAS COSTAS ESPAÑOLAS

Apendice nº 8

ESTUDIO DE LA ENERGIA DEL OLAJE : DATOS VISUALES

ESQUEMA GENERAL

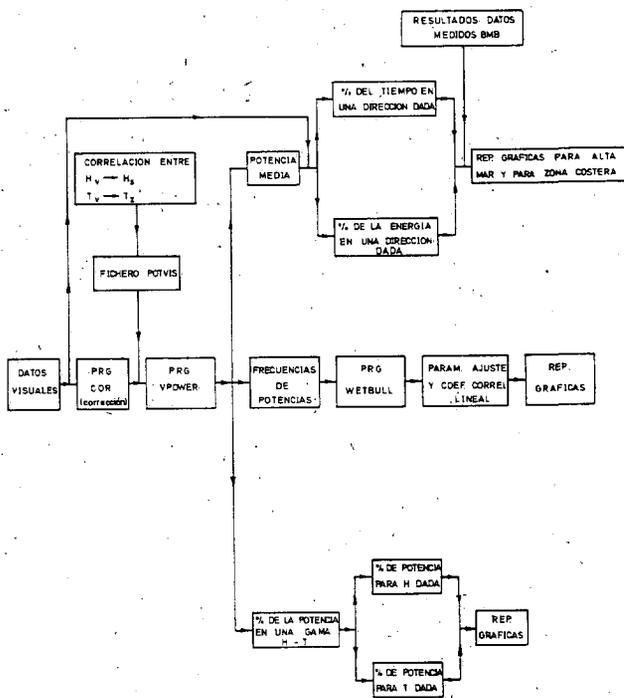


Figura 15.—Esquema del tratamiento de los datos visuales.

Area	Dominante	Energía
Finisterre	Oeste	22.72
Cantábrico	Oeste	21.72
S. Vicente	OON	17.17
Mediterráneo	OON	20.55

b) Potencias medias

Area	Potencia media (Kw/h)
Finisterre	28.93
Cantábrico	18.57
S. Vicente	15.23
Mediterráneo	7.43

c) Distribución de energía por estaciones, en porcentaje sobre la energía total. Entre paréntesis, resultados medidos en Bilbao.

Area	Invierno	Primavera
Finisterre	42.81	23.93
Cantábrico	42.42 (39)	21.31 (24)
S. Vicente	39.38	27.68
Mediterráneo	38.90	24.35

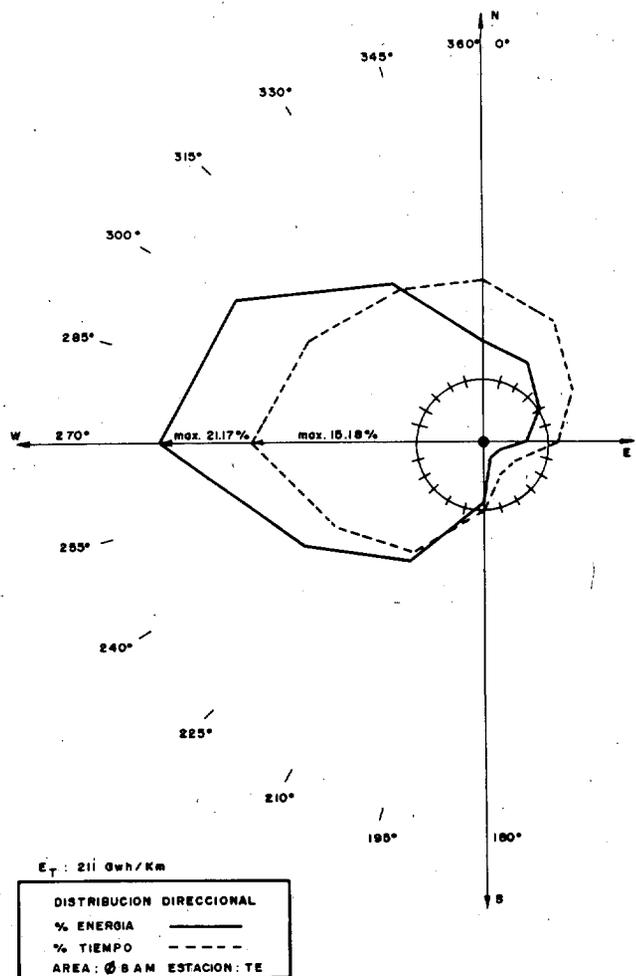


Figura 16.—Distribución direccional de la energía y del tiempo. Area 8. Altamar todas las estaciones

Area	Verano	Otoño
Finisterre	9.76	23.50
Cantábrico	12.45 (10)	23.20 (28)
S. Vicente	11.84	21.11
Mediterráneo	14.12	22.62

En la figura 16 se muestra un ejemplo de distribución por direcciones de porcentaje del tiempo y de la energía, en este caso para el área 08 (Cantábrico) en alta mar y para todas las estaciones. Se puede observar la dominancia de la dirección oeste, que en su sector de 180° aporta el 80 por 100 de la energía total.

En las áreas próximas a las costas, por ahora las más adecuadas para una explotación económica de los posibles ingenios, no son posibles los oleajes de todas las direcciones.

Para extrapolar los resultados de alta mar a

la costa, se efectúan las siguientes hipótesis:

a) Todos los oleajes con direcciones de avance procedentes de la costa próxima son imposibles. Se considera calma el período de tiempo con oleaje de esas direcciones.

b) Se supone que el oleaje que aborda la costa en una dirección determinada, antes de acusar el fondo, tiene la misma energía que el oleaje de la misma dirección en altamar.

c) En aquellos sectores divididos por la costa, se toma el 50 por 100 del total del sector.

Los resultados para las potencias medias obtenidas son:

Costa del Cantábrico Oriental:	11.01 Kw/m
Costa del Cantábrico Occidental:	16.76 Kw/m
Costa NO Gallega:	26.71 Kw/m
Costa O Gallega:	23.31 Kw/m
Costa O San Vicente:	11.01 Kw/m
Costa Cádiz:	5.70 Kw/m
Costa del Sol:	2.37 Kw/m
Costa Levante Sur:	1.84 Kw/m

Es necesario resaltar aquí que los datos del área 11 y 12 son dudosamente extrapolables al Golfo de Cádiz y al Mar de Alborán, por sufrir importantes limitaciones de fetch, es decir, los datos para estas zonas de la tabla anterior están seguramente sobrevalorados.

En la figura 17 se muestra el caso de la figura 16 extrapolado a la costa por este método. En este caso, la dirección dominante es la OON, con el 31,42 por 100 de la energía en ese sector de 30°. El cuadrante O-N aporta el 75 por 100 de la energía total como media en el Cantábrico.

Comparando estos resultados con los medidos en Bilbao, San Ciprián y Carboneras, la correspondencia es bastante buena, siendo un poco inferiores los resultados obtenidos a partir de los datos visuales, debido posiblemente a que los barcos eviten las áreas de temporales.

Todas las tablas y gráficos de resultados se recopilan en la Tesis Doctoral (12).

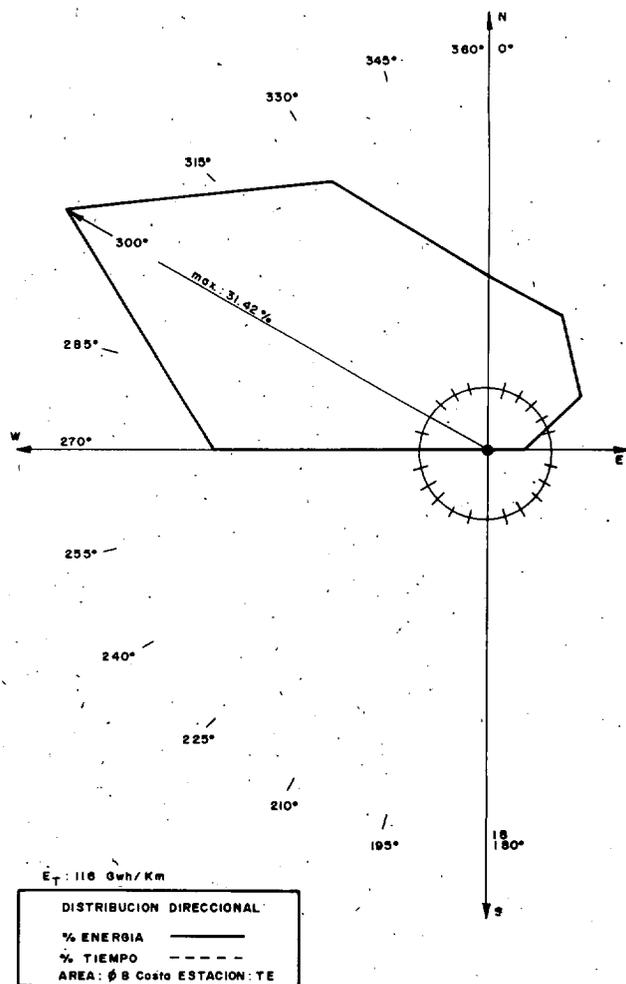


Figura 17.—Distribución direccional de la energía y del tiempo. Área 8. Todas las estaciones.

5. CONCLUSIONES

1. El oleaje es una fuente extremadamente irregular de energía: La figura 7 muestra claramente la diferencia en un orden de magnitud entre los datos del Cantábrico y los de costa levantina. Se notan claramente las variaciones estacionales y entre años consecutivos. La potencia media en un mes invernal puede ser hasta 10 veces la de un mes de verano. La potencia media en dos años consecutivos puede variar hasta un factor de dos. En períodos de tiempo menores, las variaciones en el flujo de energía pueden ser muy importantes:

- En los temporales, la potencia media de dos días consecutivos puede diferir en un factor de treinta. La potencia media en

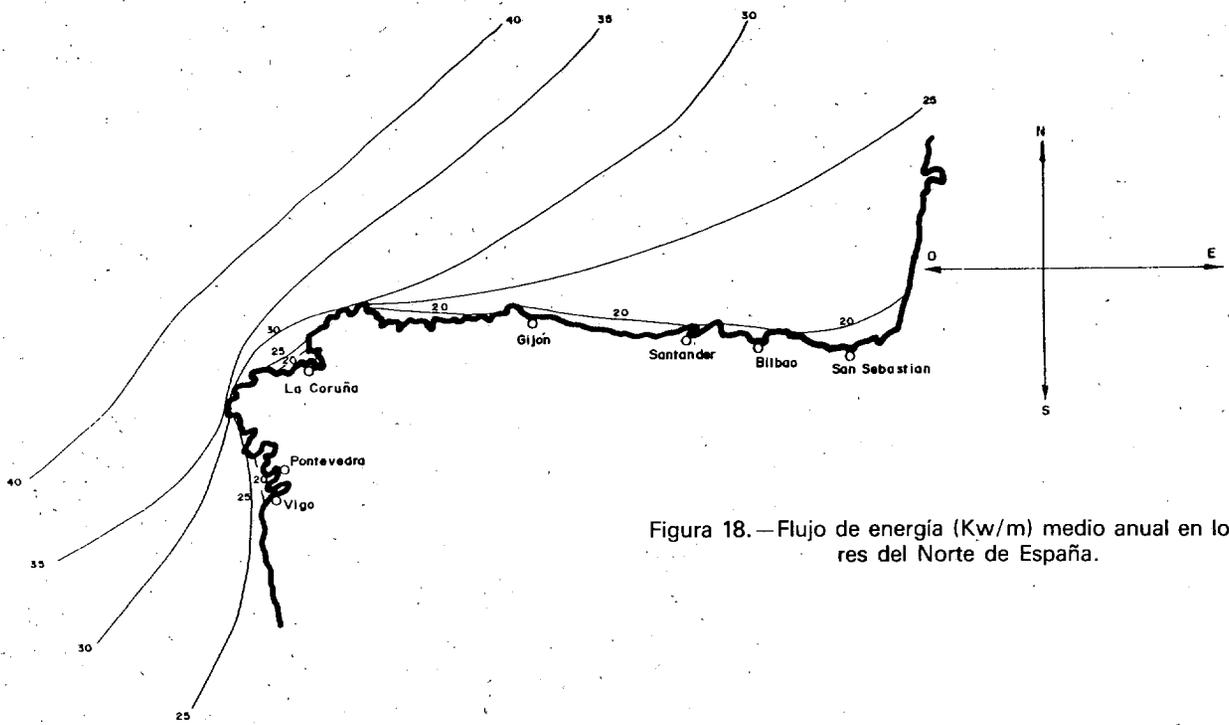


Figura 18.—Flujo de energía (Kw/m) medio anual en los mares del Norte de España.

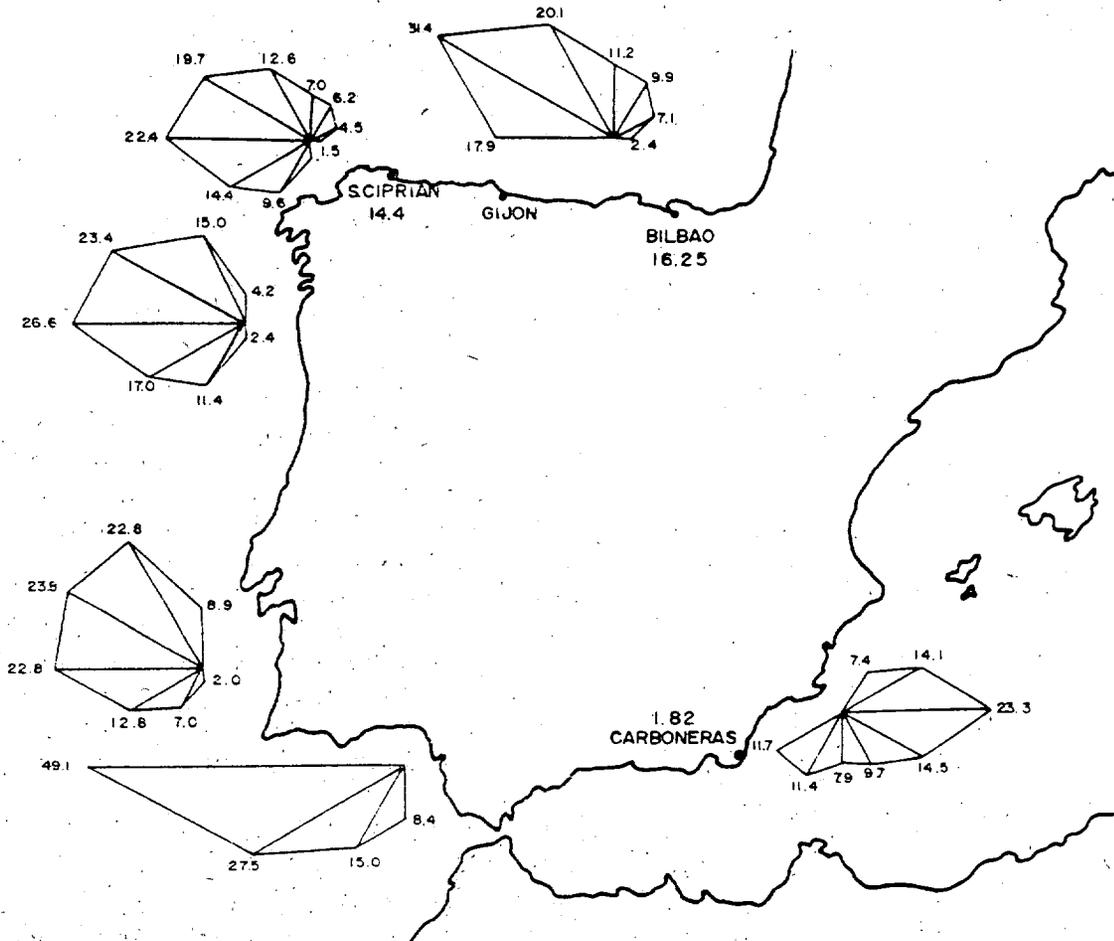


Figura 19.—Flujo de energía (Kw/m) en los puntos de registro y distribución direccional en %.

dos estados de mar consecutivos de tres horas puede variar en un factor de tres.

- La energía de las olas individuales dentro de un grupo de olas (variaciones < 5 minutos) puede diferir en un factor de cincuenta.
- La energía aportada por unos pocos temporales supone una fracción significativa de la energía total. En San Ciprián, los temporales con $H_s > 5$ m suponen un 0,67 por 100 del tiempo total y aportan el 8,3 por 100 de la energía. Para Bilbao, estas cifras son el 0,89 por 100 y el 11,4 respectivamente.

2. Las costas españolas más adecuadas, por su potencial, para el aprovechamiento de la energía del oleaje son las Atlánticas del Cantábrico y Galicia.

La potencia media anual, figura 18, en estas costas oscila entre los 15 y 25 Kw/m. En altamar los valores oscilan entre 25 y 40 Kw/m. Por direcciones, figura 19, la Noroeste es dominante y reinante en las costas Cantábricas, y la Oeste en las Gallegas, con un 31,4 por 100 y un 22 por 100 de la energía en esos sectores, respectivamente. Los períodos medios de mayor energía, figura 10, oscilan entre los 7 y 10 segundos con el 53 por 100 de la total en Bilbao y el 55 por 100 en San Ciprián. En cuanto a las alturas significantes, entre $1 < H_s < 4$ m se encuentra el 78 por 100 de la energía en San Ciprián y el 75 por 100 en Bilbao.

El potencial teórico medio anual de las costas Cantábricas y Gallega supone unos 13 GW o 114 Wh/año.

3. Los datos visuales infravaloran la energía disponible, debido posiblemente a que los barcos evitan las áreas de gran agitación. Por otro lado, aportan la única información existente sobre la dirección del oleaje, figura 19.

4. Comparativamente con la energía aprovechable en las costas de Europa Occidental, figura 20, las costas del Norte y Noroeste de la Península se encuentran entre las más favorecidas, con un nivel energético alto, la energía concentradas en pocas direcciones y gran abundancia de oleajes regulares (swell), generados en el Atlántico, de mejor aprovechamiento que

los oleajes en zona de generación (sea), con espectros de frecuencias mucho más anchos.

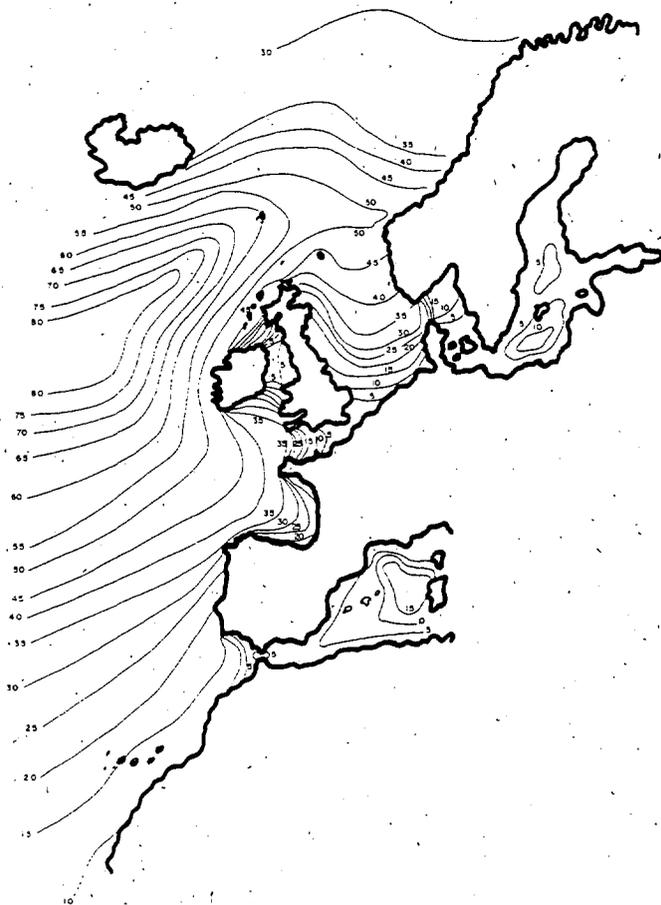


Figura 20.—Flujo de energía medio anual (Kw/m) en los mares de Europa occidental.

BIBLIOGRAFIA

1. LEISHMAN, J. M. y SCOBIE, G., (1976): «The Development of Wave Power». A Techno-Economic Study. National Engineering Laboratory. East Kilbride Glasgow, Scotland.
2. CRIPS, G. N. y SCOTT, M., (1981): «The Spatial Distribution of Wave Power of the Western U. K. Coast». 2nd Symp. on Wave and Tidal Energy. Cambridge. England.
3. BERGDAHL, L., CLAESON, L., FALKEMO, C., FORSBERG, J. y RYLANDER, R., (1979): «The Swedish Wave Energy Research Programme». Proc. of 1st Symp. on Wave Energy Utilization. Chalmers Univ. Göttemburg. Sweden.
4. TORSETHAUGEN, K., (1982): «The Norwegian Wave Climate Mapping Programme». 2nd. Sump. on Wave Energy Utilization. National Institute of Technology. Trondheim. Norway.

5. BAIRD, W. F. y MOGRIDGE, G.R., (1982): «An Evaluation of the Energy of Wind Generated Water Waves in the Coastal Areas of Canada». National Research Council. Canada.
6. NATH, I. H. y WILLIAMS, R. M., (1976): «Preliminary Feasibility Study for Utilization of Wave Energy». Energy Research and Development Administration Solar Energy Division. USA.
7. NURICK, G. N. y DUTKIWEICZ, R. K., (1978): «Wave Energy off the Coast of Southern of Africa». 1st Symp. on Wave and Tidal Energy. Canterbury. England.
8. HOGBEN, N. y LUMB, F., (1967): «Ocean Wave Statistics». National Physical Laboratory. HMSO. London. U.K.
9. DRAPER, L., (1966): «The Analysis and Presentation of Wave Data. A Plea for Uniformity». Coastal Engineering. Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 1-11.
10. DEAN, R. G., (1979): «Evaluation and Development of Water Wave Theories for Engineering Application». Vol. I and II, US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Special Report o 1, II/74.
11. JARDINE, T. P., (1979). «The Reliability of Visually Observed Wave Heights». Coastal Engineering, 3. pp. 33-38.
12. VIDAL, C.: «Estudio de las Disponibilidades de Energía del Oleaje en el Mar Cantábrico». Selección y Análisis en Modelo Matemático y Físico de un Sistema Rompeolas Hidroneumático Fijo Colector para el Aprovechamiento de la Energía del Oleaje. Tesis Doctoral. E.T.S.I.C.C.P., Universidad de Santander.
13. PHILLIPS, O.M., 1977: «The Dynamics of the Upper Ocean». Cambridge University Press.

César Vidal Pascual



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Santander en junio de 1979. En septiembre de 1979 pasa a formar parte, como becario, del Equipo del Departamento de Puertos de la citada escuela, obteniendo en Enero de 1980 la Beca para la Formación del Personal Investigador. En septiembre

de 1981 es contratado como Profesor Ayudante y en 1983 obtiene el contrato de Profesor Colaborador de la Universidad de Santander. Doctor Ingeniero de Caminos en junio de 1984 con la Tesis Doctoral: Estudio de las disponibilidades de energía del oleaje en el mar Cantábrico, selección y análisis en modelo matemático y físico de un sistema rompeolas hidroneumático fijo colector para el aprovechamiento de la energía del oleaje, dirigida por don Miguel Angel Corniero Lera. Ha participado en varios trabajos de Investigación del Departamento de Puertos y en la actualidad se encuentra realizando un Trabajo de Investigación sobre la influencia de la geometría de los morros de los diques en su estabilidad y en la agitación interior de la dársena, para la Dirección General de Puertos.

