

Pedro Suárez Bores, iniciador de la medida sistemática del oleaje en España

MERCEDES MARTÍNEZ CLEMENTE (*), JOSÉ CARLOS SANTÁS LÓPEZ (**) y LUIS TEJEDOR MARTÍNEZ (***)

El Profesor Suárez Bores desarrolló una gran labor en el campo de la Ingeniería de Puertos y Costas, sabiendo aunar el progreso de la técnica con la enseñanza y la investigación. Sus aportaciones científicas al estudio del oleaje, sus publicaciones relativas a la fiabilidad de los sistemas de diseño, etc., son el resultado de su gran actividad investigadora. En este artículo nos centraremos en su contribución a impulsar la creación de un banco de datos de oleaje en las costas españolas.

A principios de la década de los setenta, durante su labor como subdirector del entonces Laboratorio de Puertos "Ramón Iribarren" hoy Centro de Estudios de Puertos y Costas, comprendió la imperiosa necesidad de disponer de un banco de datos de oleaje. Para conseguir esto era necesaria la creación de una red, con carácter permanente, de medida de oleaje en las costas españolas. Así surgió la REMRO (Red Española de Medida y Registro de Oleaje) cuya ampliación ha seguido desarrollando el Centro de Estudios de Puertos y Costas hasta el año 2008, en que fue transferida a Puertos del Estado.

Los primeros estudios teóricos para el conocimiento del oleaje aparecen en el siglo XVII con Isaac Newton y forman cuerpo de doctrina con la teoría de la onda de gravedad-Gerstner (1809), Airy (1845), Stokes (1880)-. Sin embargo y siguiendo al Profesor D. Pedro Pérez de la Sala en su "Tratado de Construcciones en el Mar", la aplicabilidad de los resultados de estos estudios teóricos "...son de dudosa aplicación a las olas, en cuanto a lo que se refiere a las construcciones...", dado que "... las fórmulas a que conducen son en extremo complicadas y solo es posible deducir de ellas algunos resultados generales, ..."

1. OLA DE CÁLCULO

Desde el punto de vista de aplicación a la construcción, hasta finales de los sesenta había dos enfoques distintos para determinar la ola de cálculo para el proyecto de una obra marítima.

1.1. MÉTODO DETERMINISTA

La primera consideración teórica fue realizada por Thomas Stevenson, ingeniero escocés que propuso en 1874 la primera fórmula que relacionaba la altura máxima de ola y el *fetch*. La proporcionalidad entre ambas la ajustó mediante observaciones visuales realizadas en el Mar del Norte. La fórmula propuesta fue:

$$H = 0.336 F^{0.5}$$

donde F es la longitud del *fetch* en kilómetros y H es la altura máxima de ola en metros.

Esta fórmula, muy apropiada para longitudes de *fetch* no muy cortos (superiores a 37 Km.), fue muy utilizada hasta tiempos recientes por los ingenieros de habla inglesa.

Siguiendo esta metodología el Prof. Iribarren desarrolló su formulación, que fue publicada en 1941.

Posteriormente, en 1954 y 1965, fue de nuevo revisada por el mismo autor, ajustándola con datos visuales obtenidos por él mismo en las costas del Norte de España.

La fórmula de Iribarren, ampliamente utilizada por los ingenieros españoles e hispanoamericanos, es:

$$H = 1.2 F^{0.25}$$

Con posterioridad el factor de proporcionalidad propuesto fue modificado aún por el Prof. Iribarren en colaboración con el Prof. Suárez Bores, pasando a ser 1.25, e identificando H con la altura de ola significativa, es decir:

$$H_{sig} = 1.25 F^{0.25}$$

1.2. MÉTODO ESTADÍSTICO

El precedente de los métodos de previsión de oleaje es el método manual desarrollado por el U.S. Army Corp Eng, 1947, posteriormente revisado por Sverdrup y Munk, donde se presentan una serie de gráficos en que por primera vez se relaciona la altura y el período de ola significativa con la velocidad del viento y el *fetch*. Posteriormente fue completado en 1952 por Bretschneider, por lo que este método se denomina SMB en honor de sus autores. El uso de este método de previsión de oleaje proporcionó información estadística en el punto de previsión. La única condición era disponer de cartas meteorológicas con la distribución de presión atmosférica al nivel del mar a partir de las cuales puede estimarse la acción del viento sobre la superficie del mar.

En 1953, Neumann propuso un espectro de energía obtenido a partir de datos visuales tomados desde barcos. Poco tiempo después, en 1955, Pierson, Neumann y James, desarrollan una nueva técnica de previsión de oleaje, basándose en el espectro de energía (método PNJ).

A finales de los cincuenta algunos investigadores americanos, Saville (1953); Neumann (1955), Bretschneider (1956) obtienen estimas de regímenes de oleaje y de temporales para zonas importantes de las costas americanas.

En 1964, Pierson y Moskowitz proponen un espectro de energía para oleaje totalmente desarrollado. En este mismo año es cuando Suárez Bores establece las bases del método integrado de previsión espectral del oleaje utilizando el espectro de Pierson - Moskowitz, plasmando más tarde sus ideas, en 1967, en una publicación interna del Laboratorio de Puertos¹ sobre la estructura del oleaje.

(*) Doctora en Ciencias Físicas.

(**) Doctor en Ciencias del Mar.

(***) Doctor en Ciencias Físicas.

1 P. Suárez Bores, "Introducción a la estructura del oleaje". Laboratorio de Puertos, publicación 4-B. Madrid. 1967.

En 1973 Hasselmann y otros investigadores publican el espectro JONSWAP método especialmente válido para oleajes parcialmente desarrollados.

En 1974 Pedro Suárez Bores, utilizando su método integrado de previsión espectral, obtiene los regímenes de temporales en varias zonas del litoral español.

En 1976 Losada y Serrano presentan un método direccional de previsión de oleaje.

Con base en uno de estos métodos de previsión de oleaje se pueden obtener los datos para calcular las estimas estadísticas de regímenes extremales de altura de ola significativa.

Este procedimiento que permite obtener estimas estadísticas de regímenes de temporales tiene la dificultad de lo extremadamente laborioso de su confección, sin contar con la falta de fiabilidad, cuando la distribución de las isobaras en las cartas meteorológicas no está muy definida por falta de datos experimentales. Estos inconvenientes llevaron a Suárez Bores a pensar en la necesidad de la creación de un banco de datos de oleaje obtenidos mediante medidas in-situ.

La introducción de la Estadística aporta un cambio de visión. Según palabras del propio Suárez Bores, el oleaje deja de ser considerado como una onda teórica para ser considerado como un proceso estocástico de dos componentes. uno de fluctuación, de corto periodo, descrito por las distribuciones de las variables correspondientes a un estado del mar dado (H , T , γ , etc.), y otro de largo período, descrito por las correspondientes distribuciones de sus variables características en el año medio ($H_{1/3}$, T_{opt} , N , etc.).

Se precisa un amplio conocimiento del clima de oleaje del pasado para poder predecir con un buen grado de aproximación las características extremales del oleaje dentro de un cierto tiempo futuro, periodo de retorno, así como el margen de error esperable.

La gran diferencia entre el nuevo modelo estadístico con el antiguo, determinista, consiste en que las variables ambientales que determinan el proyecto de obras marítimas (viento, oleaje, etc.) tienen modelos que obedecen a procesos estocásticos, algunos de ellos cíclicos, que obligan a series de observaciones muy largas. Por ello es evidente la necesidad de realizar medidas sistemáticas reales del oleaje en la costa y conformar un banco de datos de sencilla explotación, para poder hacer una determinación precisa de la distribución de las variables de interés.

Ante este reto el Profesor Suárez Bores (1967), por entonces Subdirector del Laboratorio de Puertos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, actualmente CEDEX, y Catedrático de Puertos de la Escuela de I. C. C. y P. de Madrid, planteó una alternativa con su proyecto REMRO.

2. PROYECTO DE LA REMRO

Nada mejor que transcribir aquí la idea del profesor Suárez Bores con sus propias palabras:

La REMRO estaría formada por un número limitado de registradores, situados sobre profundidades indefinidas, no afectadas por refracción, difracción, ni efecto de configuración del fetch, situados a distancias tales que no existan entre ellos singularidades ni variaciones climáticas importantes, Estos registradores funcionarían indefinidamente y registrarían la variación del oleaje con la precisión que se desee, solo dependiente de las características de los registradores.

Las características del oleaje en cualquier punto de la costa puede entonces obtenerse mediante las correspondientes funciones de transferencia entre ese punto y los registradores exteriores (estaciones), lo que puede lograrse por vía

analítica, o lo que es mejor, con la instalación durante un año de un registrador en ese punto. De esta manera transformamos el problema bidimensional de observación del oleaje, que requiere la instalación de un número desmesurado de registradores y un presupuesto imposible, en un problema unidimensional, con un número muy limitado de registradores.

En aquellos momentos solamente existían redes locales de medida permanentes, aunque no de carácter nacional, en la costa atlántica de Estados Unidos y en Japón, por lo que el proyecto era una auténtica novedad a escala mundial.

El proyecto, por tanto, partía de la necesidad de contar con series de datos de elevación, oleaje escalar diríamos ahora, para el ajuste y previsión de regímenes medios y extremales de oleaje a partir de los estimadores estadísticos $H_{1/3}$, $T_{1/3}$, H_{max} , T_z , ..., resultantes del análisis estadístico de cada muestra o serie temporal, así como para caracterizar los espectros de energía de cada serie mediante los estimadores de los mismos (H_{m0} , T_p , T_{01} , γ , α ,...).

Obviamente, como apuntaba el profesor Suárez Bores, la situación óptima habría sido colocar tantos medidores como puntos de interés hubiera, aunque la lógica aconseja limitar el número de sistemas en base al ahorro de recursos y medios y a las facilidades disponibles para el mantenimiento y a la operatividad de la red.

Técnicamente los puntos de instalación debían ser tales que el oleaje registrado estuviera exento, en lo posible, de refracción por fondo y de difracción por accidentes costeros para que se pudiera tratar la información como "de aguas profundas" que, mediante modelos de propagación adecuados, permitiera el cubrimiento de la costa española, así como la interpolación entre puntos del litoral alejados del punto de medida. La conclusión evidente era que la mejor ubicación de los medidores era en salientes costeros con recepción de datos en faros.

La REMRO fue aprobada técnica y económicamente por el Ministerio de Obras Públicas en 1968, e instalada en los años siguientes como una red centralizada de datos, en tiempo real, (P. Suárez Bores, 1974)², con la colaboración del profesor Tejedor Martínez, (L. Tejedor, 1974)³, jefe del Área de Ingeniería Oceanográfica del Laboratorio de Puertos "Ramón Iribarren" del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, hoy CEDEX.

El elemento principal de la red era, obviamente, el sensor de oleaje. En esos momentos no existían referencias de medidores de tipo boya, por lo que el oleaje instantáneo en superficie, como variación local instantánea del nivel, se obtenía mediante equipos fondeados a media profundidad (entre 15 y 20 metros desde la superficie) en aguas de una profundidad media de 50 metros, al límite práctico de la instrumentación existente.

La atenuación en altura, y su dependencia con el periodo del oleaje, fue estudiada con detalle en el proyecto para determinar la idoneidad y campo de validez de los algoritmos a emplear para obtener la onda de superficie.

La conexión a tierra para alimentación y entrega de señal se realizaba por cable submarino, que terminaba en una estación costera, habitualmente instalada en un faro. La señal se transmitía al Laboratorio de Puertos mediante codificación

2 P. Suárez Bores, "Sea Observation in coastal waters: the Spanish offshore network"; Proc of 1st Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis; pp. 13 a 24. New Orleans, ASCE. 1974.

3 L. Tejedor, "A teleprocess system: the Spanish offshore network"; Proc of 1st Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis; pp. 186 a 196. New Orleans, ASCE. 1974.

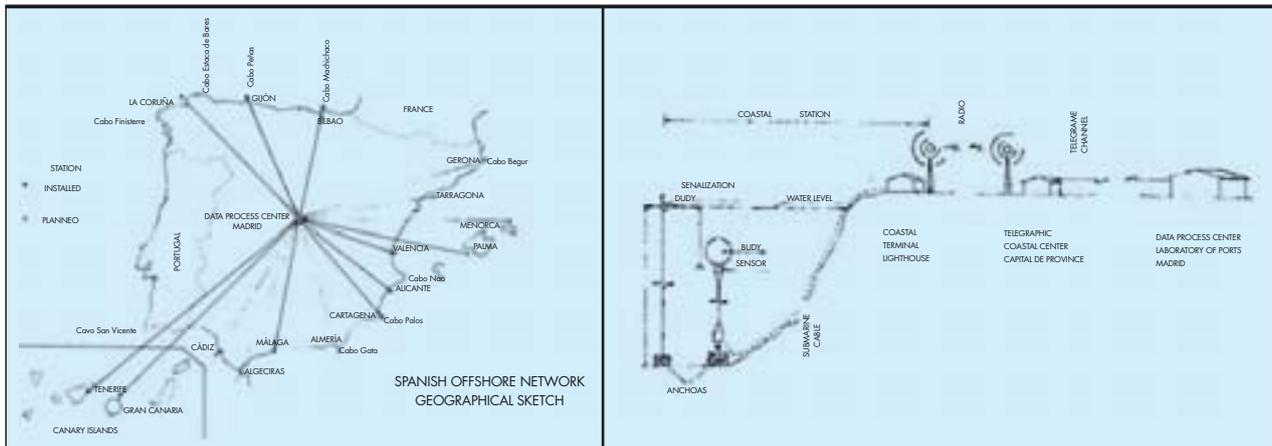


FIGURA 1. A la izquierda, ubicaciones del despliegue inicial de estaciones REMRO. A la derecha esquema del montaje de una estación, mostrando la colocación del sensor de medida, el cable submarino y la transferencia de la información a la estación central. Cercano al sensor se coloca una boya de señalización para marcar el lugar de emplazamiento del mismo y evitar accidentes.

digital desde el faro que soportaba la estación costera, por medio de la red telegráfica nacional.

La primera fase de despliegue, tenía 10 estaciones, localizadas en Cabo Machichaco (Vizcaya), Cabo Peñas (Asturias), Coruña-Ferrol (Galicia), Torremolinos (Málaga), Cabo de Palos (Murcia), Cabo de las Huertas (Alicante), Valencia (puerto), Palma de Mallorca, Las Palmas de G.C. y Santa Cruz de Tenerife, (Figura 1).

La estación central de recepción de información se instaló en el Laboratorio de Puertos del CEDEX, Madrid, estando las comunicaciones soportadas por la Dirección General de Correos y Telégrafos.

3. SISTEMA DE TELEMETRÍA

Ya en 1974 se vio que los cables submarinos constituían un eslabón muy débil en la cadena de equipos que constituían la estación, debido a la incidencia de frecuentes roturas causadas por el roce con el fondo o por mordeduras de animales marinos o terrestres. La rotura del cable equivalía al cierre de la estación hasta poder sustituirlo, lo que no era una tarea simple. Así se planteó la necesidad de buscar una alternativa más robusta del sistema marino de medida.

En Holanda acababa de salir al mercado un nuevo sistema de medida de oleaje, consistente en una boya flotante que encerraba en su interior un sensor acelerométrico capaz de registrar las diferencias instantáneas del nivel del mar en su lugar de instalación. Esta señal era enviada a tierra vía radio, donde un receptor la captaba y la entregaba al resto de la cadena de equipos hasta llegar a la estación central de recepción.

En aquellos momentos estaba en fase de construcción el Dique de Punta Lucero del puerto exterior de Bilbao y era a todas luces necesario registrar de forma continua el oleaje que incidiría sobre dicho dique dada su condición de gran obra portuaria y ser, en aquellos días, el dique de escollera realizado a mayor profundidad.

El Profesor Suárez Bores y sus colaboradores en el laboratorio de Puertos (L.Tejedor y J.C. Santás) propusieron a la Autoridad Portuaria de Bilbao la instalación y operatividad de un sistema de medida de oleaje por boya acelerométrica, con transmisión por radio y recepción en el propio puerto, sistema que ya había sido probado en el Laboratorio de Puertos en algunas campañas aisladas de carácter temporal con buenos resultados. Dicho sistema fue puesto en funcionamiento por el Puerto de Bilbao en 1975.

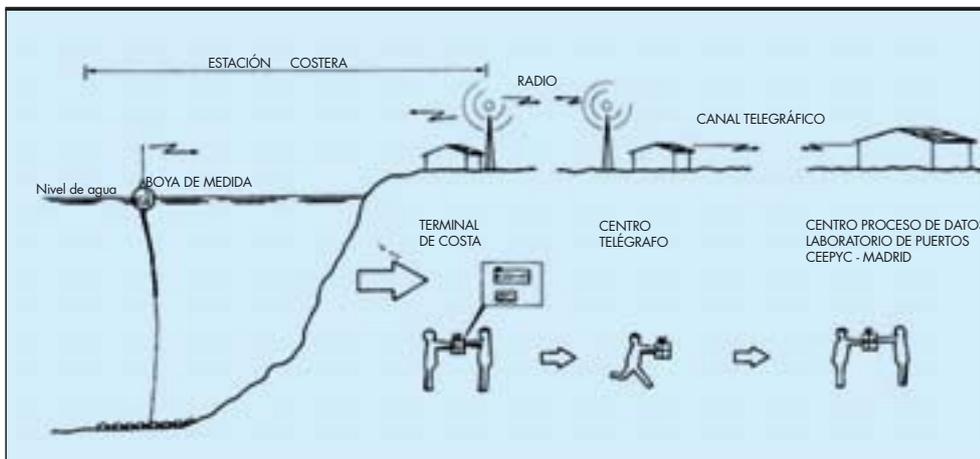
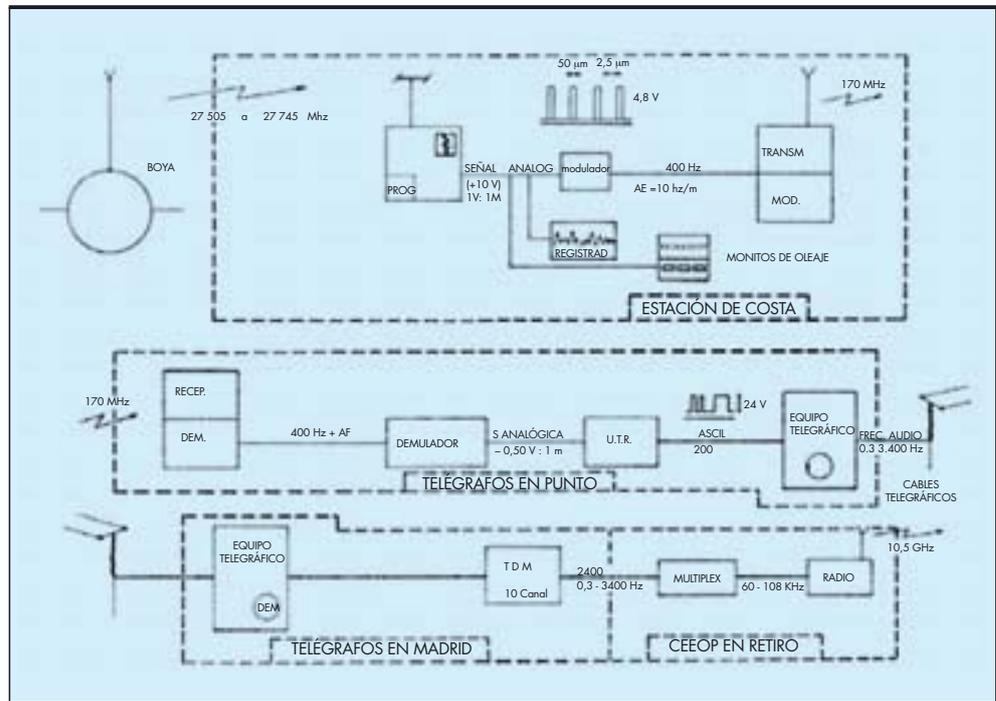


FIGURA 2. Diagrama funcional de una estación REMRO con boya de superficie (1983). En la estación costera se registra la curva del oleaje en papel, que es enviado por correo a la estación central, donde se analiza por el método de Drapper. La señal analógica que llega vía telégrafos es registrada en cintas magnéticas, tanto para su almacenamiento como para su análisis posterior.

FIGURA 3. Muestra las tres fases de acondicionamiento de la señal emitida por la boya hasta su llegada a la estación central en Madrid (CEEOP es el actual CEDEX). La señal obtenida en la estación de costa debe ser acondicionada para enviarse al centro telegráfico más cercano en el punto, desde el que llega al centro telegráfico en Madrid y, finalmente, a la estación central en el Centro de Estudios de Puertos y Costas (antes Laboratorio de Puertos, del CEDEX).



La obra del Dique de Punta Lucero se había construido de acuerdo a la tecnología más avanzada, incluidos ensayos en laboratorio aunque con oleaje monocromático, dado que no existía en España otra opción mejor. El dique se rompió, con graves consecuencias, en el transcurso de un fortísimo temporal que fue registrado en la estación de medida, con una ola máxima de más de 15 metros. La información proveniente de la boya acelerométrica permitió caracterizar las condiciones climáticas de los momentos del fallo del dique bajo el fuerte temporal. Con los datos registrados, el profesor Suárez Bores modificó los cálculos de las escolleras y el dique fue restaurado.

Por otra parte, el comportamiento del nuevo sistema medidor en condiciones marítimas muy duras avaló la conveniencia del cambio de sistema medidor existente en la red hasta ese momento por sistemas de medida de oleaje por medio de boyas acelerométricas.

El esquema de funcionamiento está representado en la Figura 2.

En las dos figuras siguientes (Figuras 3 y 4) se representan en detalle las diversas transformaciones de la señal emitida por la boya en su camino hasta la estación central.

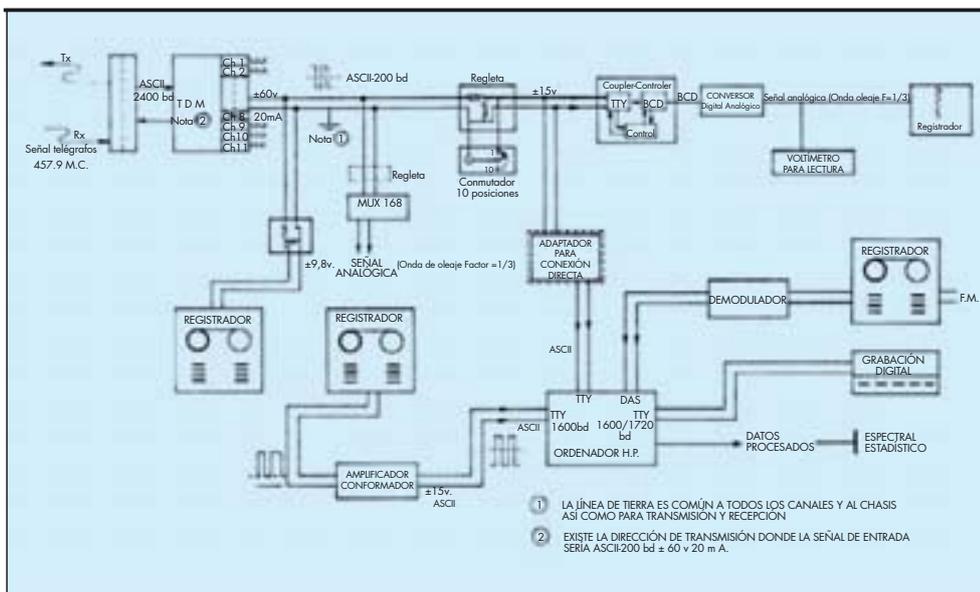


FIGURA 4. Esquema de grabación de las señales procedentes de las distintas estaciones, cada una por un canal diferente. Las señales analógicas grabadas son posteriormente procesadas en un ordenador en el que se ejecuta el programa de análisis de oleaje apropiado para obtenerse los parámetros típicos del oleaje deseados.

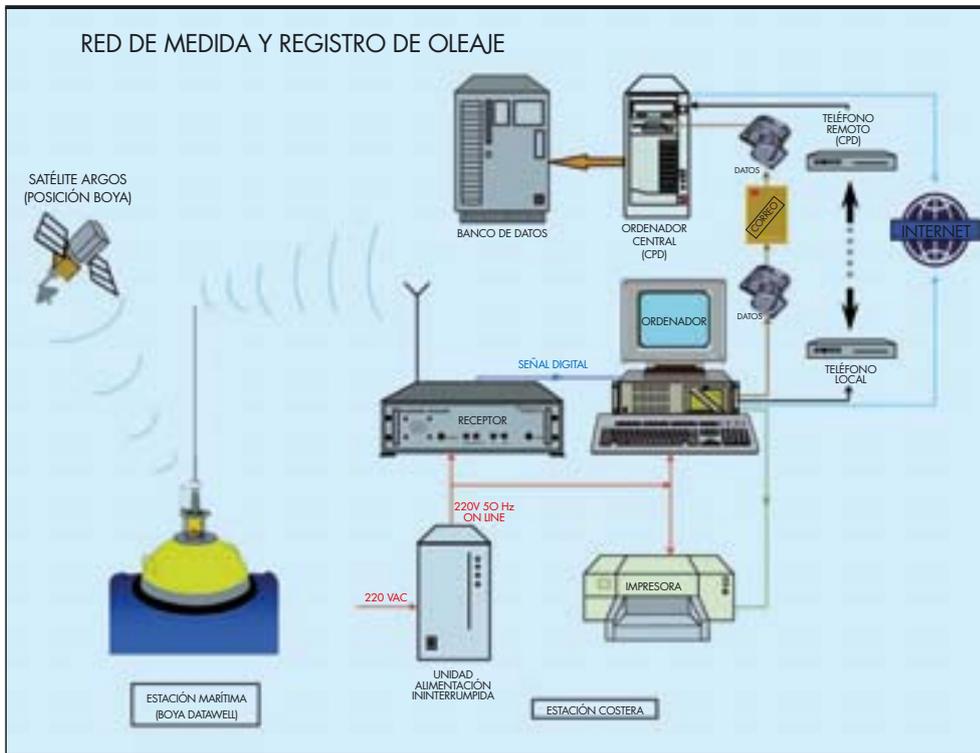


FIGURA 5. Diagrama funcional de una estación REMRO (2004). La boya es vigilada por el sistema de satélites Argos para asegurar su posición correcta y hacer su seguimiento en un eventual caso de alejamiento de la misma. Un ordenador bajo S.O. Linux en la estación costera controla el registro programado de datos. Automáticamente los datos son enviados a la estación central, que los transfiere al banco de datos. La estación central también ejerce control remoto sobre las estaciones costeras.

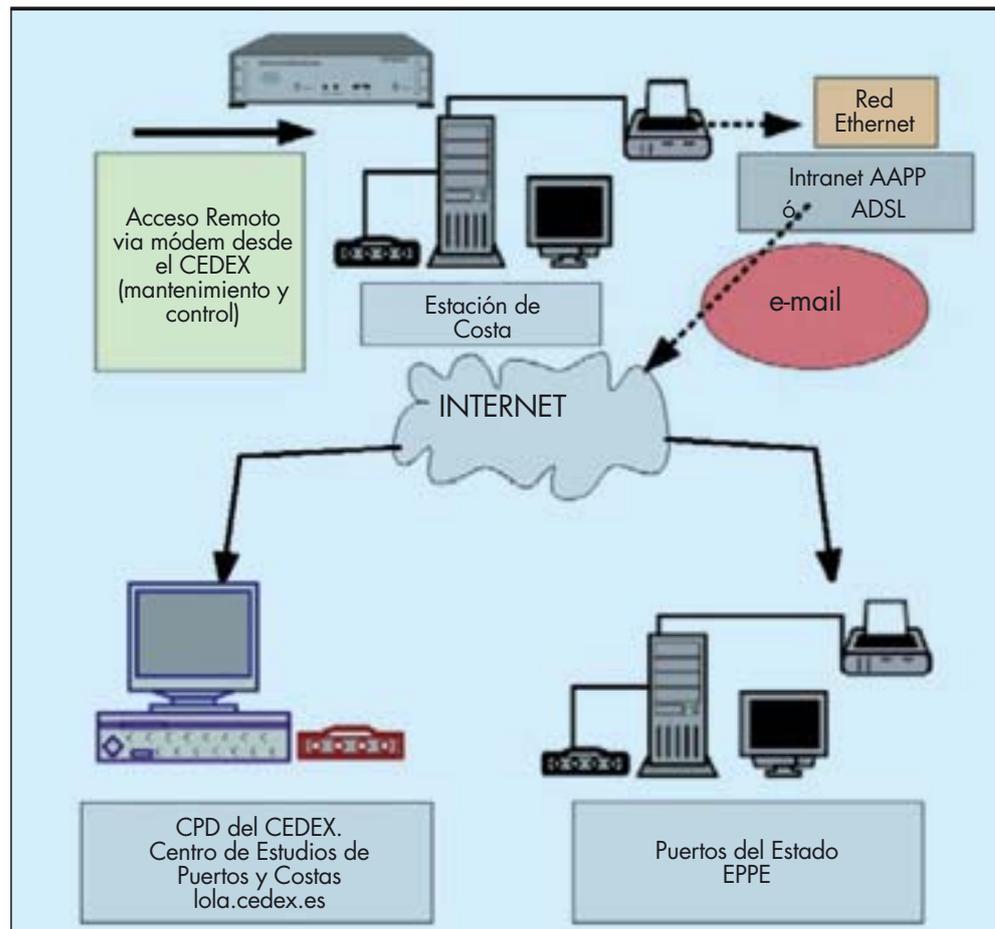


FIGURA 6. Esquema de las comunicaciones hasta 2008, fecha de la transferencia de la REMRO a Puertos del Estado los datos registrados en la estación costera eran transferidos al CEDEX para su control y a Puertos del Estado, para incluirlos en el Banco de Datos General. Desde el terminal del CEDEX se podía acceder a la configuración de las estaciones costeras, actuando como un terminal remoto de las mismas.

4. LA REMRO EN LA ACTUALIDAD

A raíz de la experiencia de Bilbao, se van sustituyendo progresivamente los sensores de presión por boyas acelerométricas, como parte del Convenio entre el CEDEX y la Dirección General de Puertos y Costas del Ministerio de Obras Públicas, siendo de destacar la colaboración de las Autoridades Portuarias participantes en el proyecto al tener una estación REMRO en su zona.

A partir de 1982, en sucesivos convenios con la Dirección General de Puertos y de acuerdo con las disponibilidades presupuestarias, se plantea una profunda reestructuración que incluye dos puntos importantes:

- Normalizar el equipamiento de todas las estaciones para dotar al conjunto de un marco de uniformidad que permitiera desarrollar un programa rutinario común de mantenimiento de los equipos y explotación de los datos.
- Incorporar progresivamente todas aquellas mejoras disponibles en cuanto a grabación de datos y comunicaciones siguiendo el rápido avance que empezaban a tener estas técnicas

En 1986, con una veintena de estaciones en funcionamiento, el registro analógico es sustituido por registro digital, eliminándose la servidumbre de la transmisión telegráfica.

Tras la creación del Organismo Público Puertos del Estado se suceden los Convenios entre este organismo y el ya CEDEX, en el transcurso de los cuales se incorporan progresiva-

mente los primeros ordenadores tipo PC, las comunicaciones por MODEM telefónico y las comunicaciones vía Internet, pudiéndose realizar transferencia de datos en ambos sentidos entre las estaciones y la estación central.

En Convenios específicos independientes Puertos del Estado – CEDEX, se incorporan también boyas de medida del oleaje direccional, nuevos programas de proceso y análisis, boyas complejas oceano-meteorológicas en aguas profundas, etc., al Banco de Datos de oleaje de Puertos del Estado, en consonancia con el objetivo estratégico de este Organismo. Diversas publicaciones en distintos foros han expuesto los avances más sobresalientes ^{4, 5, 6} en los siguientes 20 años.

Finalmente, en 2008 la gestión del proyecto REMRO es transferida totalmente a Puertos del Estado, quedando desde esos momentos incorporada al Proyecto General de Redes de Medida de Puertos del Estado.

4 M. Martínez, J.C. Santás, L. Sanz. "Spanish Network for Measurement an recording of Waves: Past, present and future". 21th International Conference on Coastal Engineering. Torremolinos (Málaga). Spain. Junio, 1988.

5 M. Martínez, J.C. Santás, L. Sanz. " Spanish Network for Wave Measurement: REMRO"; 27th International Navigation Congress. Osaka 1990.

6 M. Martínez. "La Red Española de Medida de Oleaje REMRO: un proyecto en continuo desarrollo". Revista de Ingeniería Civil". Marzo 2001.

Puerto de Málaga
ser y estar

Equipado logísticamente
Perfectamente ubicado
A 70 millas del Estrecho de Gibraltar
Y a 1.800 millas del Canal de Suez

www.malagaport.es