

# Medidas sísmicas instantaneas del fondo marino

X. Roset, E. Trullols, J. Prat, J. Del Río, I. Massana, M. Carbonell, Daniel M. Toma  
SARTI Research Group. Electronics Department, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 08800 Vilanova i la Geltrú,  
Spain

**Resumen**— El proyecto INMARSIS ha desarrollado y desplegado un equipo marino anclado que suministra datos sísmicos en tiempo real. El sistema se basa en un sismómetro submarino, una boya de superficie y un cable de amarre que los conecta. El despliegue del sistema en el entorno marino ha demostrado que la comunicación inductiva a través del mismo cable de amarre es una solución económica, segura y flexible. Antes de testear el equipo en el mar, se ha simulado la dinámica del sistema numéricamente para encontrar los materiales, cables, boyas y conexiones óptimos en condiciones marinas críticas. El sismómetro del proyecto es un geófono de banda ancha triaxial de alta sensibilidad que adquiere señales de baja vibración para medir episodios sísmicos submarinos. La energía necesaria para alimentar la boya de superficie y el equipo subacuático se obtiene de paneles solares, así como baterías adicionales. Se presentan los resultados y la detección de un terremoto del prototipo que demuestra la viabilidad del proyecto. El sismómetro transmite datos continuos mediante un radioenlace en la boya de superficie.

**Palabras clave:** – *Terremoto, Sismómetros marinos, adquisición de datos y gestión de sistemas, Comunicaciones inductivas*

## I. INTRODUCCION

Hoy en día existen diversos métodos geofísicos para investigar las propiedades del subsuelo terrestre (rocas, sedimento, agua, etc.) con métodos pasivos y activos. Los métodos pasivos detectan variaciones en los campos gravitacional o magnético de la Tierra, así como el estudio de la sismología a partir de terremotos. Mientras que los métodos activos son usados en exploración sismológica, donde se generan artificialmente señales de perturbación que son transmitidas a través del subsuelo, las modificaciones que sufren estas señales en sus trayectos de propagación, proporcionan información de las características de los materiales que atraviesan. La sismología aplicada ha tenido en las últimas décadas un avance espectacular y ha sido de gran importancia para el estudio de la estructura y propiedades las rocas que conforman el interior de la Tierra.

La actividad sísmica en 2013, en la costa de Vinaròs provocada por un almacen de gas o la actividad sísmica submarina asociada directamente a la erupción de El Hierro en

las Islas Canarias en 2011 y 2012 muestra la importancia de controlar movimientos sísmicos marinos no cubiertos por redes de terrestres.

La medición de los eventos sísmicos regionales en tiempo real permite una estimación rápida de las escalas de terremotos reales, ya que la sismicidad medida nos da directamente el tamaño real del terremoto. En la última década, se han propuesto y probado diversas tecnologías para abordar estos desafíos, como los sismómetros de fondos oceánicos (OBS) [1], [2], [3], [4], los OBS conectados acústicamente a boyas de superficie o vehículos de superficie [5] [6] y boyas flotantes [7]. Una red OBS cableados es la mejor tecnología para estudios sísmicos marinos, con un ancho de banda de transmisión de datos y energía ilimitados, pero su implementación es muy costosa y está restringida a ubicaciones donde se puedan desplegar. Hay soluciones más asequibles como los OBS conectados acústicamente a boyas de superficie, pero estas estaciones *broadband* de fondo oceánico que aplican un enlace acústico entre equipo fondeado y la superficie, están acotadas por la latencia de la comunicación, el gasto de energía y el ancho de banda.

Con estas premisas, hemos desarrollado y construido una nueva tecnología para un sismómetro de banda ancha de fondo oceánico aislado que aprovecha la filosofía de los OBS que el grupo de investigación ya tiene experiencia, pero en este caso para medidas sísmicas pasivas, es decir, para detectar terremotos en el momento que se producen.

## II. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

En este trabajo se desc un sistema OBS amarrado, con telemetría continua a través de la línea de amarre y boya a la estación costera, capaz de proporcionar buenas observaciones azimut de eventos sísmicos regionales. El sistema OBS amarrado es capaz de terremotos de baja intensidad ( $1.5 < M < 5$ ), localizados a profundidades de hasta 100 km, y con período naturales nominal de 1 segundo. Esto requiere un ancho de banda de 0,5 a 30 Hz con 18 bits de resolución, una relación señal a ruido por encima de 60 dB y una tasa de pérdida de datos de comunicación inferior al 10%. Por lo tanto, se asume la transferencia de datos sísmicos degradados, ya que la pérdida de paquetes a corto plazo puede ocurrir en el sistema OBS amarrado [8].

### A. Descripción del Proyecto INTMARSIS

Se ha diseñado y construido un equipo marino que recopila datos sísmicos en tiempo real. Las pruebas de campo se realizaron en junio de 2017, a 20 m de profundidad y a 2 millas náuticas de la costa de Vilanova i la Geltrú (Barcelona), cerca del observatorio submarino OBSEA. El diseño consiste en un

sismómetro marino de fondo marino con un sensor sísmico de banda ancha y una boya de superficie conectada a un cable con una boya intermedia (figura 1). La validación de este prototipo se realizó comparando los datos con el sismómetro instalado en OBSEA [Nanometrics]. El sistema sísmico transmite datos continuos de 1 kbps a un controlador en la boya de superficie que proporciona las marcas de tiempo para cada paquete de datos. El controlador en la boya envía las medidas al laboratorio terrestre en UPC-SARTI, a unos 5 km de distancia. Un receptor de GPS en la boya de superficie se configura para marcar todos los datos provenientes del OBS en el lecho marino, lo que permite integrar datos de estos sistemas submarinos en la red de datos sísmicos existente. Los datos del canal vertical se almacenan constantemente con un algoritmo de activación que cambia grabando las 3 componentes para eventos especiales. Los usuarios a demanda también pueden solicitar el paquete de datos de los tres canales por cortos períodos de tiempo. [3].

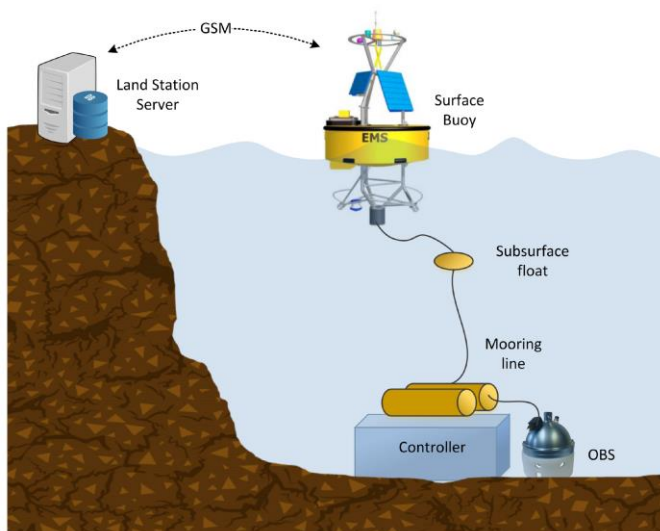


Figura 1 Conjunto del sistema de medida sísmica oceánicas

### B. Simulaciones

En las simulaciones realizadas mediante el programa ORCAFLEX el valor más crítico fué la tensión soportada por la Línea 2 en el fondo marino (zona derecha fig.2). Si esta tensión fuera suficientemente grande podría producir movimientos y desplazamientos en el anclaje y también vibraciones que podrían afectar las mediciones del sismómetro cercano. En condiciones normales, se prevé que el rango de desplazamiento de la boya de superficie no dependa de la relación de línea, de unos 12 m en el Modelo 1 y 8 m en el Modelo 2. Algunos de los resultados obtenidos con las simulaciones se pueden observar en la Tabla 1 donde los dos modelos son comparados para comprobar la idoneidad de diseñar un cable con elastómero como el descrito por el modelo 2.

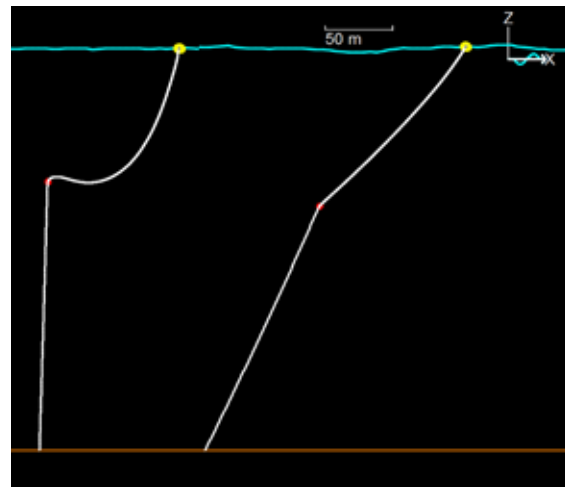


Fig. 2. Simulación de la respuesta vertical con ORCAFLEX

		Modelo 1	Modelo 2
<b>Línea 1</b>	Tipo	Cable acero	elastómero
	longitud (m)	120 / 140 / 160	17 / 24 / 28
longitud (m)	longitud (m)	Cable acero	Cable acero
	longitud (m)	200	280

Tabla 1. Configuración de las líneas para diferentes modelos

### C. Sismómetro del fondo marino

La unidad del fondo del mar consiste en un ancla, un sismómetro que alberga 3 geófonos (uno para cada eje), la electrónica asociada y las baterías (Figura 2). El sismómetro de banda ancha de Güralp 6TC es un OBS estanco con una sensibilidad de 1630 V/m/s para cada geófono y con una frecuencia de corte a 0,033 Hz para poder detectar movimientos hasta esta baja frecuencia. Como se ilustra en la Figura 3, la caja inferior permite desplazar el material excedente como arena, lodo u otro tipo de sedimentos, logrando un buen acoplamiento con el fondo marino. Cuando el sismómetro se posa por primera vez en el lecho marino, se realiza un centrado de masas, operación que puede realizarse desde la base terrestre mediante el enlace de comunicación bireccional proporcionado por el cable inductivo y el de RF.



Figura 3 Prototipo de OBS cableado preparado en muelle

El equipo es una modificación del OBS broadband autónomo [14] añadiendo un módem inductivo y su procesador de interfaz asociado (figura 3). Se ha construido un paquete de baterías de iones de litio que sirve como alimentación principal. El microcontrolador es el LPC 4357 y el módulo de almacenamiento una tarjeta de memoria microSD de 64 GB. El LPC 4357 es el encargado de configurar del módulo ADC seleccionando la velocidad de muestreo y las operaciones de baja potencia. El programa de adquisición mide señales continuamente desde los canales de entrada a través de un bus QSPI (Interfaz de periféricos en serie en cola), realiza marcas de tiempo locales utilizando el RTC integrado (Reloj de tiempo real) y almacena los datos en la tarjeta de memoria microSD.

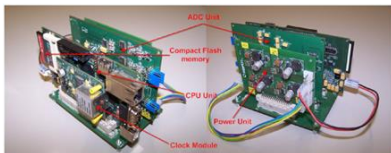


Fig.4 Sistema de adquisición y diagrama de bloques de la electrónica OBS. La interfaz del módem inductivo se conecta al OBS a través de una línea serie

#### D. Montaje en la boya de superficie

En la construcción de la boya en superficie se han considerado varios factores, como el peso a soportar y las tensiones del cable de amarre para diferentes exigencias atmosféricas y de corrientes. Esta boya ha sido diseñada para albergar los elementos electrónicos que recopilan datos, dispositivos de comunicación y los que suministran energía. La boya de superficie preparada para recibir del OBS fondeado es fácil de instalar por científicos no expertos con el despliegue de sismómetros marinos y con barcos no especialmente preparados para la investigación.



Figura 5. Boya de superficie

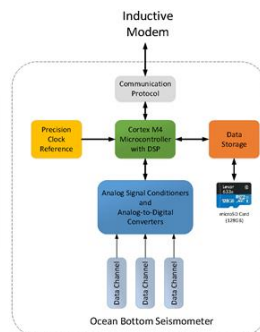
Se trata de una boya toroidal de 2 metros de diámetro EMS 2.0 (Figura 5) [12]. Esta boya incorpora cuatro paneles solares de 12V y 32Wp @ 92Wh, dos controles de carga solar y baterías selladas de plomo y gel de 12V/120Ah que suministran y almacenan la energía requerida, un módem AirLink Raven RV50 y un controlador con la plataforma Raspberry Pi con un UIMM Sea-Bird para comunicar inductivamente con el sismómetro fondeado.

### III. EL SISTEMA DE AMARRE Y LA COMUNICACIÓN INDUCTIVA

Inicialmente se propusieron dos modelos diferentes, en los que se estudió numéricamente su dinámica a fin de contruir con materiales, cables, boyas y conexiones óptimos con condiciones climáticas adversas. Como se prevé en un futuro un despliegue del equipo en el Mar de Alborán (Mediterráneo Occidental), área sísmica activa de 250-300 m de profundidad, donde se han realizado simulaciones para esta ubicación. Se estudiaron las condiciones meteorológicas de la falla de Carboneras en Alborán para disponer de valores de viento, olas y corriente en los casos de situaciones meteorológicas normales y extremas. El software OrcaFlex ha sido utilizado para simular la dinámica de los modelos de amarres propuestos sometidos a estas condiciones marítimas.

En las simulaciones se ha propuesto diferentes configuraciones de amarre del cable, la definitiva ha sido con una boya intermedia que soporta parte del peso del cable de forma que se minimizan los efectos de desplazamientos y tensiones del anclaje. Se estudió la posibilidad de un cable de acero y otro donde se añadía un elastómero (modelo 2). En un modelo 1 el cable de amarre era forrado de plástico. Los dos terminales deben conectarse a la tierra del fondo marino, cerrando el lazo del circuito y así se permite una transferencia de datos a través del campo magnético.

Los resultados numéricos de las simulaciones han permitido determinar que el modelo 2 proporciona mejores comportamientos con tensiones 4 veces menores. La boya ha sido sobredimensionada para soportar condiciones extremas.



#### IV. RESULTADOS

Los resultados de las pruebas hechas en el mar cerca del observatorio submarino OBSEA han evidenciado la capacidad del equipo para transmitir medidas sísmicas marinas casi en tiempo real a la estación terrestre mediante un enlace inductivo subacuático y un radioenlace con pérdida de paquetes inferior a 3%. Debido a la alta sensibilidad del sismómetro marino de banda ancha, las medidas adquiridas en estos tests han demostrado que con este equipo se puede medir un terremoto a distancia. La Figura 6 muestra los datos sísmicos registrados por el sismómetro de un terremoto ubicado en Hautes-Pyrénées, de magnitud 3.7 que sucedió el 28 de octubre de 2017 a las 19.06 UTC. La diferencia de tiempo de viaje corresponde a una distancia epicentral del terremoto de aproximadamente 218 km, comporvado por la estación sísmica del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (www.icgc.cat) y el OBS cableado instalado en el observatorio OBSEA (www.obsea.es).

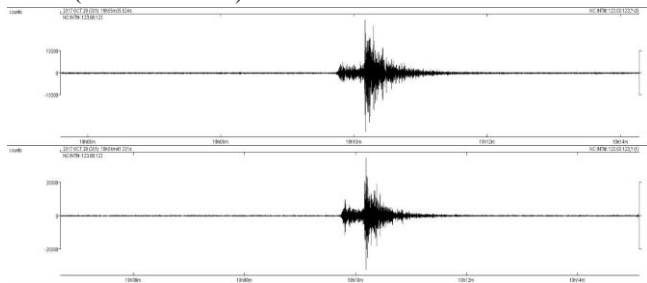


Figura 6 -Registro del sismo de magnitud 3,7 en Hautes-Pyrénées adquirido con el equipo

#### V. CONCLUSION

Se ha diseñado, construido y validado un sismómetro unido a una boya de superficie como alternativa a un sismómetro marino clásico. AEn este caso la conexión física entre el sismómetro y la boya garantiza comunicar datos en tiempo real con suficiente ancho de banda para estudiar la actividad sísmica cercana y lejana. Después de realizar las simulaciones con un ORCAFLEX se ha propuesto una configuración de amarre con una boya intermedia.

El prototipo consiste en un equipo fondeado (sismómetro de Güralp 6YC-OBS Gimbal) y uno de superficie (boya EMS 2.0) interconectados por un cable de acero que permite la transmisión de datos DPSK inductiva entre sensor y receptor y, en consecuencia, la transmisión de datos en tiempo real a través de RF, GSM o enlace por satélite a la estación terrestre. Las pruebas de despliegue y validación se hicieron en junio de 2017 a 2 millas náuticas de la costa de Vilanova i la Geltrú (Barcelona), cerca del observatorio submarino OBSEA a 20 m de profundidad. La verificación del sistema ha permitido la detección de un evento sísmico de magnitud 3.7 centrado en Hautes-Pyrénées, aecido el 28 de octubre a las 19.06 UTC. Generalmente, los eventos sísmicos van desde 0.05 a 30 Hz. Nuestro equipo, en las condiciones meteorológicas estudiadas,

transmite las vibraciones del fondo marino alrededor de 0.1, 0.2 y 0.6 Hz que se superponen parcialmente al rango sísmico. Se debe prestar especial atención para identificar los eventos sísmicos de baja frecuencia. Las vibraciones del anclaje cercano debido a las olas que pueden ser medidas dentro de la señal del geófono, no obstante, este comportamiento puede ser caracterizado mediante el enfoque elástico con un simple modelo de masa-resorte-amortiguador de la interacción OBS/fondo marino que permite el análisis de datos de acoplamiento de amplitud [15]. También es posible hacer correcciones para este problema mediante el vector de infidelidad del acoplamiento [16]. Nuestro estudio dinámico del sistema y la posibilidad de segregar los datos sísmicos mediante el análisis espectral allana el camino a una nueva generación de boyas sísmicas, más compactas, más ligeras y más fáciles de implementar.

#### AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad español bajo el contrato CGL2013-42557-R (Interoperabilidad e Instrumentación de Plataformas Autónomas Marinas para la Monitorización Sísmica, INTMARSIS). Los autores extienden su agradecimiento a Orcina por su apoyo y la oferta de la licencia académica OrcaFlex N1594 (2015) a la Universitat Politècnica de Catalunya. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto RESBIO, Redes de Sensores Submarinos Autonomos e Cableados Aplicados a la Monitorizacion Remota de Indicadores Biologicos, TEC2017-87861-R, Convocatoria 2017 Proyectos De I+D+I, del Programa Estatal de Investigacion, Desarrollo e Innovacion Orientada a los Retos de la Sociedad del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Este trabajo ha sido liderado y llevado a cabo por miembros de la unidad asociada al Tecnoterra del Consejo de Investigación Científica a través de la Universidad Politècnica de Cataluña, el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera y el Instituto de Ciencias del Mar.

#### REFERENCIAS

- [1] Romanowicz, B., D. Stakes, D. Dolenc, D. Neuhauser, P. McGill, R. Uhrhammer, and T. Ramirez (2006), The monterey bay broadband ocean bottom seismic observatory, *Ann Geophys.*, 49, 607–623.
- [2] P. Phibbs, R. Cook, “NEPTUNE Canada Cable Ocean Observatory - Now a Reality”, SubOptic 2010, Yokohama, Japan.
- [3] Frontera, T., A. Ugalde, C. Olivera, J. A. Jara, and X. Goula (2010), Seismic ambient noise characterization of a new permanent broadband ocean bottom seismometer site offshore catalonia (northeastern Iberian Peninsula), *Seismol. Res. Lett.*, 81, 740–749.
- [4] O. Pallarés, J. Cadena-Muñoz, N. Carreras, D. M. Toma and J. del-Río-Fernández, “Contribution to COBS synchronization with PTP IEEE std. 1588,” *2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*, Bergen, 2013, pp. 1-4. doi: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607958
- [5] Frye, D., J. Ware, M. Grund, J. Partan, P. Koski, S. Singh, L. Freitag, J. Collins, R. Detrick (2005). An acoustically-linked deep-ocean observatory, in *Oceans 2005—Europe*, vol. 2, pp. 969–974, IEEE, Brest, France, doi:10.1109/OCEANSE.2005.1513188
- [6] Berger, J., Laske, G., Babcock, J. & Orcutt, J. An ocean bottom seismic observatory with near real-time telemetry, *Earth and Space Science* 3, 68–77 (2016)

- [7]Hello, Y., Ogé, A., Sukhovich, A. & Nolet, G. Modern Mermaids: New Floats Image the Deep Earth. *Earth and Space Science, Transactions American Geophysical Union* 92, 337–338 (2011).
- [8]Mànuel, A., Roset, X., del Rio, J., Toma, D.M., Carreras, N., Panahi, S.S., Garcia-Benadí, A., Owen, T., Cadena, J. Ocean Bottom Seismometer: Design and Test of a Measurement System for Marine Seismology. *Sensors Open Paper* 2012
- [9]Jacopo, A. et al. The New Seafloor Observatory (OBSEA) for Remote and Long-Term Coastal Ecosystem Monitoring. *Sensors Open Paper* 2011
- [10] Seabird Inductive Modem. Available Online: [ftp://soest.hawaii.edu/bhowe/outgoing/AMM/ALOHA\\_Mooring/ALOHA%20Mooring/Inductive%20Data/IMtutorialRev5.pdf](ftp://soest.hawaii.edu/bhowe/outgoing/AMM/ALOHA_Mooring/ALOHA%20Mooring/Inductive%20Data/IMtutorialRev5.pdf).
- [11] Prat, J., Massana, I., del Rio, J. Simulations of a moored power cable at OBSEA platform. *Oceans 13 IEEE/OES Bergen: The Northern dimension and Challenges* 2013; ISBN 978-1-4799-0000-8.
- [12] <http://www.ems-sistemas.com>
- [13] Gobad, J.I., and Grosenbaugh, M.A. Time-domain numerical simulation of ocean cable structures. *Ocean Eng.* 2006; Vol. 33 N 10 Pg. 1373–1400.
- [14] Carbonell, M., Massana, I., Prat, J., Trullols, E., del Rio, J. Simulations and design of a sea moored buoy with a real time data undersea seismometer. *Oceans 17 IEEE Aberdeen*; ISBN 978-1-5090-5278-3
- [15] Osler, J.C. and Chapman, D.M.F. Quantifying the interaction of an ocean bottom with the seabed. *Journal Geophysical Res.* Vol 103 N.B5 Pg. 9878-9894 (1998)
- [16] Gaiser, J.E. Detector coupling corrections for vector infidelity of multicomponent OBC data. *Geo*