

## OS-IS® Sistema sismico per il monitoraggio e la previsione del moto ondoso

L. Iafolla<sup>\*</sup> (\*, \*\*), C. Carmisciano (\*, \*\*\*), E. Fiorenza (\*\*), V. Iafolla (\*\*),  
G. Manzella (\*\*\*\*), L. Montani (\*\*\*\*\*), M. Bencivenga (\*\*\*\*\*), M. Burlando (\*\*\*\*\*),  
G. Solari (\*\*\*\*\*), P. De Gaetano (\*\*\*\*\*)

(\*) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, (INGV), Sezione Roma 2, sede Portovenere, Italia

(\*\*) Assist in Gravitation and Instrumentation (AGI srl), Monte Porzio Catone (RM), Italia

(\*\*\*) Monitoraggio Ambientale e Ricerca Innovativa Strategica (MARIS scarl), Roma, Italia

(\*\*\*\*) ETT Solutions spa, Genova, Italia

(\*\*\*\*\*) Autorità Portuale della Spezia, La Spezia, Italia

(\*\*\*\*\*) Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Roma, Italia

(\*\*\*\*\*) Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA), Università di Genova, Italia

### Abstract

Il progetto europeo “Vento, Porti e Mare” (VPM), finanziato sul Programma di cooperazione transfrontaliera Italia-Francia “Marittimo” 2007-2013, ha tra i propri obiettivi l’implementazione di un sistema di previsione e monitoraggio del moto ondoso nell’alto Tirreno, finalizzati al miglioramento della sicurezza della navigazione e alla mitigazione del rischio di incidenti nelle aree portuali.

La previsione del moto ondoso è ottenuta attraverso la messa a punto di un modello numerico per la simulazione dello stato del mare, mentre il monitoraggio è ottenuto, presso il Porto della Spezia, attraverso la realizzazione di un progetto pilota che prevede l’installazione di un sistema di rilevazione remota dello stato del mare attraverso l’utilizzo di accelerometri. Tale sistema di monitoraggio del moto ondoso, denominato OS-IS<sup>®</sup>, verrà presentato nelle sue linee fondamentali.

Il sistema di monitoraggio OS-IS<sup>®</sup> presenta il principale vantaggio di funzionare a terra senza necessità di utilizzare strumentazione in mare: esso si basa sull’impiego di accelerometri ad alta sensibilità e di opportuni algoritmi per la determinazione dei parametri del moto ondoso. Infatti, come è noto sin dall’inizio del 1900, le onde del mare sono una sorgente di rumore microsismico e tale fenomeno è stato analiticamente formalizzato con modelli sempre più precisi a partire dal 1950 da Longuet-Higgins.

Il sistema implementato in VPM è costituito da tre stazioni microsismiche installate in prossimità del Golfo della Spezia: ogni stazione è corredata da strumentazione meteorologica multi-parametrica e di un *datalogger* che trasmette in modo automatico i dati raccolti ad un server centrale. Su questo server vengono eseguiti gli algoritmi OS-IS<sup>®</sup> che convertono le misure microsismiche in altezza significativa e periodo dell’onda secondo modelli proprietari.

Sarà presentata una breve descrizione dell’apparato installato ponendo l’attenzione sul suo grado di affidabilità. Infine le prime misure dei parametri ondometrici saranno messe a confronto con quelle eseguite dal convenzionale sistema di boe disponibili nell’area di studio.

### Abstract □ English version

The European project “Wind, Ports, and Sea”, funded by the European Cross-border Programme “Italy–France Maritime 2007-2013”, aims to improve the safety conditions and to reduce the haz-

<sup>\*</sup> E-mail: lorenzo.iafolla@agi-tech.com

ards by monitoring and forecasting the sea-state outside the main ports of the Northern Tyrrhenian and Ligurian Seas.

The sea state forecast is done by using a numeric model specifically developed, while the used data are obtained by means of a monitoring system of stations installed in the coast of La Spezia harbor so to perform an inland remote monitoring. This remote monitoring system of the sea, called OS-IS<sup>®</sup> (Ocean Seismic - Integrated Solution), is a pilot project and will be presented in its main features.

The main advantage of the OS-IS<sup>®</sup> is that it is installed inland and there are no parts in the sea. The key elements of the system are a high sensitivity accelerometers and apposite algorithms for the evaluation of the sea state using the micro-seismic signals on the basis of the mathematical models and the appropriate calibration factors. Actually, since the beginning of the 1900, is well known that the sea waves are sources of a microseismic noise and this phenomenon has been described with more and more precise models since the 1950 by Longuet-Higgins.

The OS-IS<sup>®</sup> system used for "Wind, Ports and Sea" project is made of three micro-seismic stations installed near the La Spezia gulf: each accelerometric station is equipped with a weather station and a data logger that automatically transfers the data to a central server which runs the algorithm of the OS-IS<sup>®</sup>.

In the following will be shortly described the installed systems focusing on its reliability and in the comparison with the traditional monitoring system using buoy. Finally the first measurements will be shown in comparison with those of the conventional method based on the buoys.

### **Introduzione**

VPM (Burlando et al., 2014) è la prosecuzione del precedente progetto Vento e Porti (VP, Solari et al. 2012) che si basava sulla misura del vento e sulla sua previsione a medio termine (fino a 72 ore) e a breve termine (fino a 1.5 ore) in un'area che interessa i principali porti del Mar Tirreno Settenzionale e del Mar Ligure. VP implementava modelli numerici sviluppati dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli Studi di Genova. In VPM il sistema viene integrato con misure e previsioni a medio termine dello stato del mare nella stessa area geografica. OS-IS<sup>®</sup> è stato implementato nell'ambito del progetto VPM.

Tali progetti sono di notevole interesse poiché forniscono alle Autorità Portuali degli strumenti utili per la programmazione delle attività dei porti garantendone i dovuti limiti di sicurezza. Infatti, le condizioni del vento e del mare possono causare situazioni di pericolo per il personale in prossimità di strutture e infrastrutture nel porto e nelle aree circostanti quali, ad esempio, navi ormeggiate o in fase di avvicinamento al porto, colonne di container vuoti etc. Grazie al monitoraggio e alle previsioni possono essere prese le dovute misure di sicurezza, regolando in modo efficiente le attività portuali. Inoltre, le registrazioni dello stato del mare forniscono utili elementi per la progettazione di infrastrutture marittime (es. dighe foranee, banchine, etc.).

Il monitoraggio del moto ondoso in prossimità del Golfo della Spezia è eseguito con il metodo brevettato OS-IS<sup>®</sup> di cui ne è stato anche registrato il marchio a nome di AGI srl, MARIS scarl e INGV. Il metodo OS-IS<sup>®</sup> è interamente costituito da strumentazione a terra senza alcun sensore posto sulla superficie o sul fondale marino. Questa caratteristica evita i problemi tipici della strumentazione a mare: deterioramento della strumentazione dovuto all'ambiente particolarmente ostile, necessità di interdizione alla navigazione della zona di mare circostante alla boa, danneggiamento accidentale della strumentazione o del suo sistema di ormeggio causato da navi o pescherecci, furto, atti vandalici, etc. In generale si cerca di evitare questo tipo di problemi utilizzando delle boe di maggiori dimensioni, più robuste e visibili, ma va sottolineato che boe con scafo ed ormeggio più piccoli producono misure di maggior accuratezza, per cui un giusto compromesso è auspicabile (M. Bencivenga et al., 2012). Da quanto detto è chiara la difficoltà di installazione e manutenzione delle stazioni ondometriche tradizionali da eseguire in mare con personale esperto e imbarcazioni adeguate, così come il conseguente elevato costo.

Il metodo OS-IS® ha l'ambizioso scopo di risolvere le precedenti problematiche svincolando, la misura dello stato del mare dall'uso di boe con scafi e sistemi di ormeggio molto sofisticati. In quanto segue daremo una descrizione più dettagliata del metodo OS-IS e della sua implementazione nell'ambito del progetto VPM.

### Dalle onde del mare alle vibrazioni microsismiche

Il fenomeno su cui si fonda il metodo OS-IS® è ben noto sin dall'inizio del 1900 ed è stato modellizzato a partire dal 1950 (Longuet, Higgins, 1950). Esso consiste nella generazione di un segnale microsismico da parte del moto ondoso del mare dovuta alla variazione della pressione esercitata sul fondale marino dalla colonna d'acqua sovrastante. Con semplici calcoli si può dimostrare che in caso di onde stazionarie e profondità molto maggiore della lunghezza delle onde, il baricentro della colonna oscilla al doppio della frequenza delle onde stesse. Questa variazione della posizione del baricentro produce un segnale microsismico la cui forma spettrale è identica a quella delle onde del mare ma a frequenza doppia ("picco secondario" in Figura 1); il metodo OS-IS® si concentra su questo segnale. Altri fenomeni producono un segnale microsismico di minore intensità rispetto al primo, ma con la stessa frequenza delle onde ("picco primario" in Figura 2): il fenomeno non è ancora ben compreso e in pochi studi presenti in letteratura esso è stato correlato allo stato del mare.

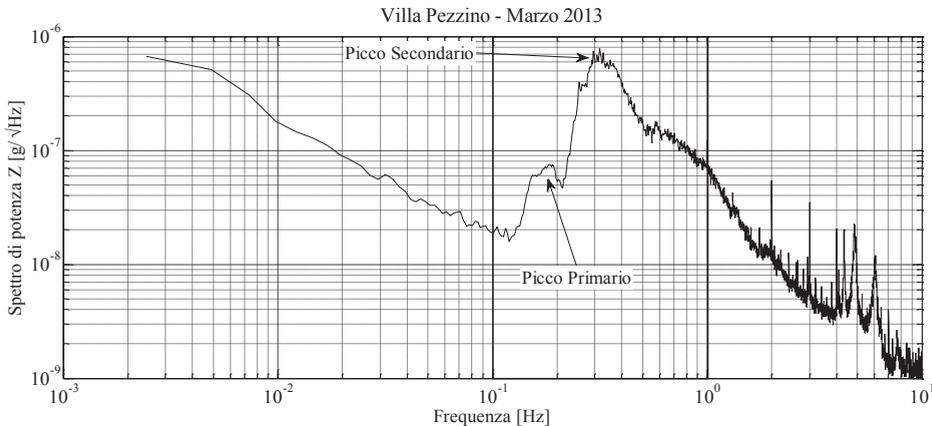


Figura 1 - Spettro di potenza dell'accelerazione microsismica registrata lungo la verticale a poche decine di metri dal mare presso la sede INGV di Porto Venere (Villa Pezzino). Il rettangolo individua le frequenze di interesse per la misura dello stato del mare; al suo interno sono indicati il picco primario ed il picco secondario.

Nel seguito sono riportate le relazioni utilizzate per determinare l'altezza significativa dell'onda  $H_S$  e il suo periodo di picco  $T_p$ , a partire dalle registrazioni microsismiche centrate sul picco secondario:

$$H_S = a \sqrt{\int_c^d E(f) \cdot df + b} \quad T_p = 2/f_p; \quad E(f_p) = \max_f \{E(f)\}.$$

In queste relazioni  $f$  indica la frequenza,  $E(f)$  la densità spettrale del segnale microsismico,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  sono parametri di calibrazione,  $f_p$  è la frequenza di picco. I parametri di calibrazione possono essere determinati dai modelli teorici o utilizzando misure eseguite da boe temporaneamente installate nelle zone di mare di interesse.

La letteratura scientifica si concentra prevalentemente sui modelli che spiegano il fenomeno (es. Ardhuin et al., 2011, 2012 e Barruol et al., 2006) o sull'uso delle serie storiche registrate dalle reti sismiche per migliorare i campioni statistici dei modelli climatici che riguardano gli oceani (es. Tilotson, Komar, 1997 e Bromirski et al. 1999) mentre i riferimenti specifici nell'uso di tale fenomeno ai fini di monitoraggio del moto ondoso sono molto scarsi. Di fatto, l'implementazione del metodo OS-IS® per VPM è uno dei primissimi casi di installazioni microsismiche il cui scopo principale è la misura del moto ondoso, piuttosto che di monitoraggio sismico.

### Descrizione della strumentazione

Nell'ambito del progetto VPM sono state installate le seguenti tre stazioni multi-parametriche indicate sulla mappa di Figura 2:

1. Villa Pezzino, Sede INGV di Porto Venere (violetto sulla mappa);
2. Santa Teresa, Sede ENEA di Lerici (giallo);
3. Bonassola, Sede CNR (bianco).

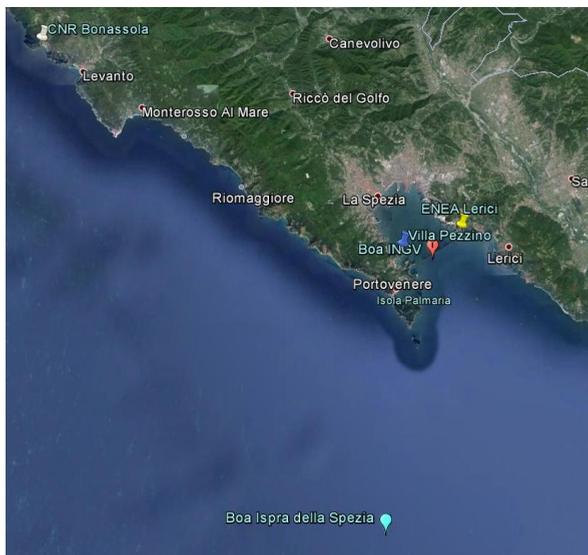


Figura 2 - Posizione geografica delle tre stazioni microsismiche e della boa ISPRA di La Spezia.

Ogni stazione è costituita dai componenti indicati nella seguente lista, interconnessi tra loro secondo lo schema riportato nella Figura 3.

1. Accelerometro;
2. Stazione Meteo;
3. Ricevitore GPS per la sincronizzazione temporale;
4. Data-logger.

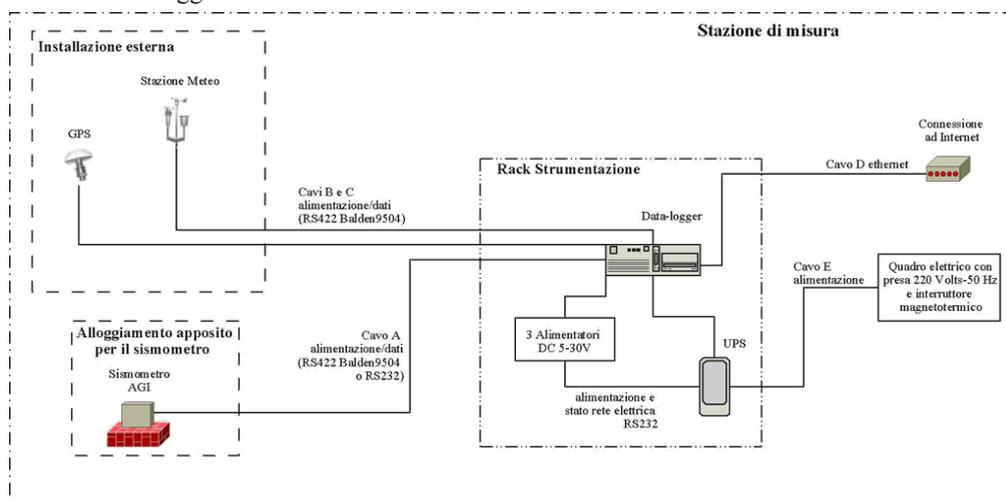


Figura 3 - Schema generale delle stazioni multi-parametri installate per VPM.

L'accelerometro esegue le misure microsismiche ed è il componente essenziale per il metodo OS-IS<sup>®</sup>; nella Figura 4 sono riassunte le sue caratteristiche principali. L'aspetto fondamentale è la capacità di misurare piccoli segnali nella banda di frequenze di interesse per le onde del mare (da  $10^{-1}$  Hz a 1 Hz); la frequenza di acquisizione scelta è di 10 Hz in modo da evitare eventuali problemi legati all'*aliasing*.

Produttore	AGI srl
Banda di frequenze	$10^{-3}$ Hz – 10 Hz
Rumore di fondo elettronico	$\sim 10^{-8}$ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Assi sensibili	x, y, z
Dinamica	120 dB
Linearità	> 80 dB
Peso	2.5 Kg
Dimensioni	155x125x125 mm
Alimentazione	5V esterna o con USB
Potenza assorbita	<100 mW
Batteria	Incorporata, 3.6-5.4 A/h
Termometro	PT10000
Interfaccia di comunicazione	USB, RS232
Protocollo di comunicazione	NMEA
Processore embedded per pre-elaborazione, controllo e acquisizione	

Figura 4 - Caratteristiche dell'accelerometro utilizzato per VPM.

Le misure eseguite sono registrate dal data-logger che provvede ad aggiungere una marcatura temporale basata sul segnale GPS che consente di sincronizzare i dati delle tre stazioni con una accuratezza migliore di 0.1 secondi, da confrontare con il periodo del segnale relativo alle onde (> 1 secondo).

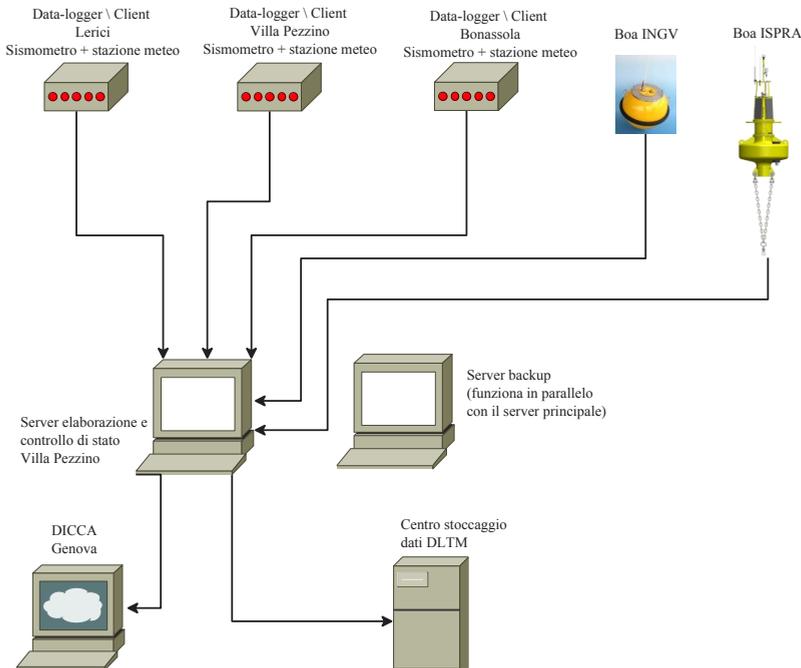


Figura 5 - Architettura della rete di acquisizione per il progetto VPM.

Il *datalogger*, oltre a raccogliere i dati dell'accelerometro e dalla stazione meteo, provvede al loro trasferimento via internet con una cadenza di 10 minuti ad un server centrale di raccolta ed elaborazione. Il sistema è inoltre dotato di un modulo UPS (Uninterruptible Power Supply) che garantisce la continuità elettrica e ne migliora l'affidabilità.

L'attuale rete è costituita dagli elementi indicati nella seguente lista, mentre in Figura 5 è mostrata la loro interconnessione

1. Tre Stazioni microsismiche;
2. Boa ISPRA;
3. Boa INGV temporanea;
4. Due server di raccolta ed elaborazione dei dati.

Come già accennato le boe sono utilizzate in fase di calibrazione degli algoritmi di conversione del dato sismico in dato "ondametrico". In particolare sono stati utilizzati i dati pubblici della boa I-SPRA, ma si sta procedendo alla installazione temporanea di una boa temporanea dell'INGV all'ingresso del golfo della Spezia allo scopo specifico della calibrazione del sistema OS-IS®.

I server di raccolta dati sono ridondanti per evitare punti singoli di vulnerabilità che possono causare il non funzionamento dell'intero sistema. Ad ogni server sono demandati i seguenti compiti:

1. raccolta dati;
2. elaborazioni per la valutazione del dato ondametrico;
3. controllo dello stato di funzionamento delle stazioni microsismiche e delle boe di calibrazione;
4. trasmissione dei dati al server del DICCA.

Infine, il centro di stoccaggio del Distretto Ligure delle Tecnologie Marine (DLTM) garantisce l'archiviazione dei dati acquisiti.

### Analisi dei dati registrati

Allo stato attuale la rete di acquisizione sopra descritta è completamente funzionante ad eccezione della boa INGV. In quanto segue i dati OS-IS® relativi ai primi mesi del 2014 sono stati confrontati con quelli resi pubblici dall'ISPRA relativi alla boa di La Spezia. Va sottolineato che nel comparare queste misure si deve tenere conto della natura stocastica delle onde del mare per cui, anche utilizzando due sistemi di misura ideali ma posti ad una distanza non nulla l'uno dall'altro, non ci si possono aspettare gli stessi valori (Krogstad et al., 1999).

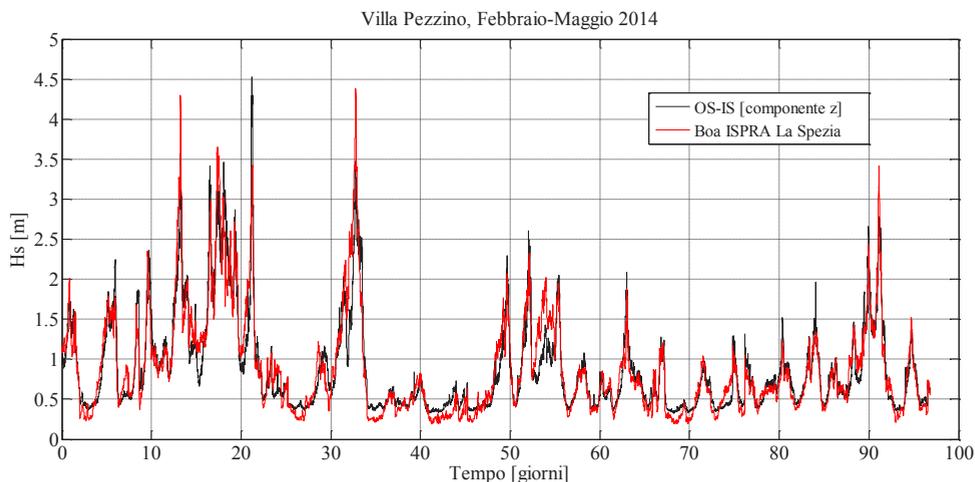


Figura 6 - Confronto tra le registrazioni dell'Hs eseguita dalla stazione di Villa Pezzino del sistema OS-IS® e della boa ISPRA di La Spezia. Il sistema OS-IS è stato calibrato utilizzando i dati della boa stessa.

In Figura 6, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono mostrate delle comparazioni tra le registrazioni dalla stazione OS-IS® di Villa Pezzino con quelle della boa ISPRA di La Spezia. Nel caso dell'altezza significativa la corrispondenza è evidente e le differenze possono essere ricondotte alla differente posizione fra i punti di misura (vedi Figura 2). Il periodo di picco è molto complesso da determinare poiché molto spesso il moto ondoso è caratterizzato da due o più picchi nello spettro di frequenza (spettro multimodale, Rodriguez e Soares, 1999) e in generale non è semplice seguire le loro variazioni nel tempo. In particolare, questo problema è molto evidente nel caso di Hs piccoli quando il rapporto segnale/rumore è molto scarso. Per questo, nel caso di mareggiate con Hs piccoli (< 0.5 m), le misure del periodo non sono sempre attendibili ed ulteriori sviluppi saranno necessari. Ciò resta comunque una questione marginale poiché valori bassi dell' Hs hanno scarso interesse nella maggior parte delle applicazioni.

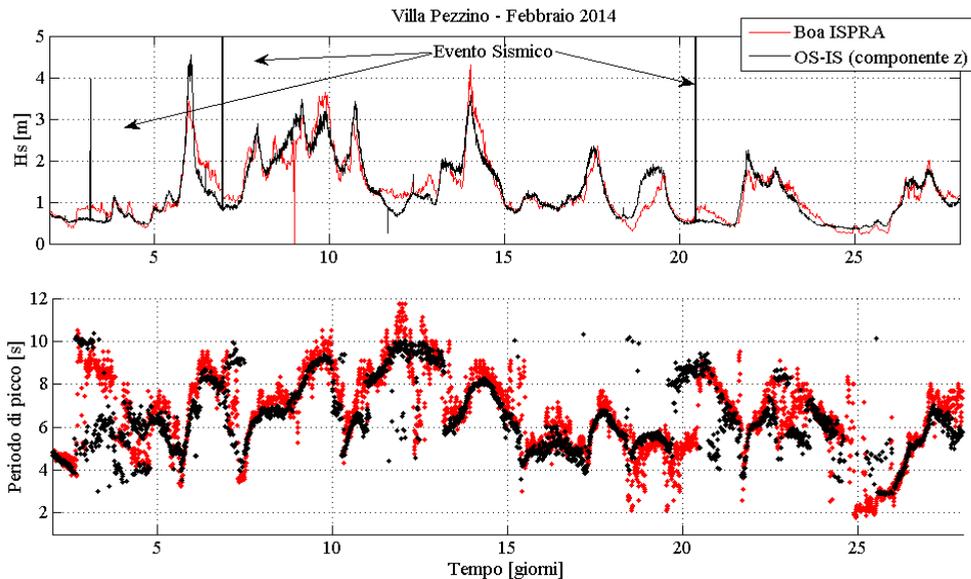


Figura 7 - Sopra: in questo dettaglio della Figura 6 sono più evidenti le differenze fra le misure dell'Hs eseguite dal sistema OS-IS® e dalla boa ISPRA: in particolare sono anche evidenziati tre eventi sismici registrati dall'accelerometro. Sotto: Confronto tra le registrazioni eseguite dal sistema OS-IS® e della boa ISPRA del periodo di picco.

### Affidabilità del sistema OS-IS®

L'affidabilità del sistema di misura è molto importante per garantire la continuità dei dati e ridurre i costi di manutenzione. Un notevole vantaggio deriva dal fatto che le stazioni si trovano a terra piuttosto che in mare per cui gli interventi sono molto più semplici.

Tutto il sistema implementato per VPM è stato progettato per essere quanto più possibile tollerante ad imprevisti o errori ed è in grado di recuperare automaticamente ai loro effetti. Nonostante si tratti di una delle sue primissime implementazioni il sistema ha già dimostrato un notevole livello di affidabilità (vedi Figura 8).

### Conclusioni

Il sistema OS-IS® implementato per il progetto VPM attualmente in piena funzionalità ha già dimostrato le sue notevoli potenzialità nell'ambito del monitoraggio dello stato del mare anche a confronto con le più consolidate tecnologie basate sulle boe. In particolare esso riscuote un grande interesse grazie alla semplicità di installazione e manutenzione, con un notevole impatto sui relativi costi di gestione.

I futuri sviluppi si concentreranno su un'analisi più efficace dei dati, in particolare sulla determinazione della direzione delle onde, sull'associazione delle misure a specifiche aree di mare e sull'interpretazione delle misure relative alla banda di frequenze centrata sul picco primario, per una determinazione più esaustiva dello stato del mare.

Possibile guasto/problema	Probabilità dell'evento	Soluzione/Intervento
Rumore microsismico di origine antropica	Mai verificatosi in VPM	Scelta opportuna del sito/nella maggior parte dei casi il rumore antropico può essere filtrato
Rumore sismico (terremoti vicini, grandi terremoti, Figura 7)	< 1 volta a settimana	Perdita dei dati ondametrici per 10/20 minuti
Deterioramento della strumentazione causato dall'ambiente	Mai verificatosi in VPM	Scelta opportuna del sito/uso di contenitori con opportuni livelli di protezione
Furto o atto di vandalismo	Mai verificatosi in VPM	Il sistema OS-IS può essere installato in zone non accessibili
Interruzione alimentazione elettrica	< 1 volta ogni 3 mesi	Uso di un UPS/intervento di un operatore locale
Interruzione connessione Internet	< 1 volta ogni 3 mesi	Intervento di un operatore locale
Malfunzionamento del sistema di misura e ACQ	Mai verificatosi in VPM	Intervento di un operatore OS-IS

Figura 8 - Possibili cause di interruzione delle misure del sistema OS-IS®.

## Bibliografia

1. Ardhuin et al., 2011, "Ocean wave sources of seismic noise", *J. Geophys. Res.*, 116, C09004.
2. Ardhuin et al., 2012, "From seismic noise to ocean wave parameters: General methods and validation", *J. Geophys. Res.*, 117, C05002.
3. Barruol et al., 2006, "Characterizing swells in the southern pacific from seismic and infrasonic noise analysis", *Geophys. J. Int.*, 164, 516-542.
4. Bencivenga et al., 2012, "The Italian Data Buoy Network (RON)", *Advances in Fluid Mechanics IX, M. Rahman and C. Brebbia, Eds., WIT Press*, 321-332
5. Bromirski et al. 1999, "Ocean wave height determined from inland seismometer data: Implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific", *J. Geophys. Res.*, 104,20,753-20,766.
6. Burlando et al., 2014, "Wind and waves numerical forecasting for safety access to port areas: the "Wind, Ports, and Sea" project", Proceedings of the 6th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2014), June 8-12, Hamburg, Germany, 4 pp
7. Krogstad et al., 1999, "Methods for intercomparison of wave measurements", *Coastal Engineering* 37, 235-257.
8. Longuet, Higgins, 1950, "A theory of the origin of the microseisms", *Proc. R Soc.London Ser. A*, 243, 1-35
9. Rodriguez e Soares, 1999, "A criterion for the automatic identification of multimodal sea wave spectra", *Applied Ocean Research* 21, 329-333
10. Solari G., M. P. Repetto, M. Burlando, P. De Gaetano, M. Parodi, M. Pizzo, and M. Tizzi (2012) The wind forecast for safety management of port areas. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 104-106, 266-277
11. Tillotson, Komar, 1997, "The wave Climate of the Pacific Northwest (Oregon and Washington): A comparison of Data Sources", *Journal of Coastal Research*, 13,2, 440-452.