

La Stazione Mareografica Integrata di Porto Garibaldi

Alberto Pellegrinelli (*), Silvano Bencivelli(**), Stefano Lovo (**), Nicola Crocetto (***),
Nicola Perfetti (****), Fabio Ricchieri (*), Paolo Russo (*)

(*) Dipartimento di Ingegneria - Università di Ferrara, via Saragat, 1 – 44100 Ferrara, alberto.pellegrinelli@unife.it

(**) Provincia di Ferrara – Acque Costiere ed Economia Ittica - Corso Isonzo, 105/a – 44100 Ferrara

(***) Facoltà di Ingegneria, II^a Università di Napoli, via Roma 29, I-81031 Aversa (Ce)

(****) Geotop srl, via Brece Bianche, 152 – 60131 Ancona Italy, Tel. +39 071 21325245, n.perfetti@geotop.it

Riassunto

Nel presente lavoro viene descritta la Stazione Mareografica Integrata di Porto Garibaldi (FE), recentemente realizzata dalla Provincia di Ferrara, ed attualmente nella fase di calibrazione ed avvio di tutta la strumentazione installata. Vengono descritte sommariamente le caratteristiche della Stazione e dei sensori installati. Viene inoltre illustrata la procedura individuata per l'elaborazione dei dati mareografici con l'applicazione di opportuni filtri per l'analisi di qualità del dato e l'estrazione dei livelli medio mare orario, giornaliero, mensile ed annuale.

Abstract

In the present work we describe the new tide gauge of Porto Garibaldi (Ferrara – Italy), designed and building in the beginning of 2009, and actually in start-up and calibration phases. We described the tide gauge and sensors characteristics and the procedure designed to sea level elaboration (based on quality control and sea level filtering).

Introduzione

La Stazione Mareografica Integrata di Porto Garibaldi (Ferrara) nasce con l'obiettivo principale di conoscere il livello istantaneo del mare in corrispondenza della foce della Rete Idrografica della provincia ferrarese (pianura padana emiliana-orientale). Quello della provincia di Ferrara è un territorio fortemente pianeggiante con più di 100.000 ettari sotto il livello medio mare Genova 42, una rete di centinaia di Km di canali di bonifica e con circa 80 impianti, tra idrovore e conche di navigazione. La gestione di una così complessa Rete Idrografica ed il controllo delle eventuali manovre sugli impianti in caso di emergenze idrauliche (onde di piena legate a forti eventi di precipitazione), non può naturalmente prescindere dalla conoscenza del livello istantaneo del mare in corrispondenza della sua foce, appunto, a Porto Garibaldi. Inoltre, per una completa gestione e pianificazione futura del territorio, risulta di grande interesse conoscere l'attuale livello medio mare di Porto Garibaldi, il suo rapporto con il datum altimetrico nazionale (Genova 42) e, naturalmente, il suo andamento nel tempo (eustatismo). Un completo monitoraggio del livello del mare rispetto alla costa dovrebbe sempre tenere in considerazione anche la geodinamica del territorio stesso, soprattutto, in zone soggette ad un sensibile fenomeno di subsidenza naturale ed antropica come nel caso della costa emiliana-romagnola. Se il livello del mare può essere attualmente monitorato con opportuni sensori mareografici, la geodinamica del sito può essere attualmente monitorata tramite la co-localizzazione di una stazione GNSS permanente, opportunamente inquadrata in un sistema geodetico internazionale; in tal caso, nella letteratura internazionale si usa l'acronimo: CGPS@TG (*Continuous GPS and Tide Gauge*).

Per raggiungere questi obiettivi, per quanto riguarda la misura del livello del mare, la stazione è stata realizzata nel pieno rispetto delle linee guide della IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission – organismo dell'UNESCO), dell'ESEAS (European Sea-Level Service) e della

PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level). Invece, per monitorare subsidenza e movimenti crostali, è stata installata una stazione permanente GNSS nel rispetto delle linee guida della rete EPN (EUREF Permanent Network) ed è stata avviata la procedura di inserimento in tale rete. Infatti, dopo alcuni anni (almeno 5), le serie temporali delle coordinate delle stazioni EPN forniscono importanti dati sulla geodinamica del territorio. Nel seguito vengono descritte le scelte progettuali e le caratteristiche della nuova stazione e, per quello che attiene la misura del livello del mare, vengono illustrate le procedure che sono state messe a punto in questi primi mesi di registrazione dei dati.

Progetto e realizzazione della Stazione Mareografica Integrata

Il progetto della nuova stazione mareografica è stato realizzato, fin dalle sue prime fasi, nel rispetto delle indicazioni fornite dalla comunità scientifica internazionale. In particolare modo, si è fatto continuo riferimento ai documenti “Manual on Sea Level – Measurement and Interpretation (vol. I, 1985; vol II, 1994; vol III, 2002, vol. IV, 2006) della IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) che rappresentano un fondamentale riferimento (aggiornato negli anni) per tutto quello che riguarda gli strumenti e le tecniche di misura del livello del mare ma anche per la validazione e l’elaborazione dei dati di livello.

L’individuazione del sito di Porto Garibaldi, oltre a soddisfare le esigenze del territorio, è legata al rispetto delle seguenti indicazioni:

- presenza di una sufficiente colonna d’acqua: almeno 2 metri al di sotto del valore più basso della marea astronomica presunta LAT (Lowest Astronomical Tide); analizzando i dati storici dei più vicini mareografici (Venezia e Ravenna della Rete Mareografica Nazionale-ISPRA) è stato individuato un valore di LAT di circa 1 m al di sotto del livello medio mare presunto MSL (Mean Sea Level), da cui si ricava quindi una colonna d’acqua minima di almeno 3 m; la profondità dell’acqua è stata verificata con 2 rilievi batimetrici realizzati con la Provincia di Ferrara, nel gennaio 2007 e nel luglio 2008, figura 1a;
- il sito si trova direttamente in mare e non risente del livello idrometrico della Rete Idrografica del territorio di pianura retrostante;
- il sito si trova in area di presumibile erosione e comunque non di accumulo di sedimenti;
- presenza nelle immediate vicinanze (circa 350 m) di un caposaldo di livellazione di alta precisione della Rete ARPA Emilia-Romagna per il controllo regionale della subsidenza; tale caposaldo (con denominazione 000650) è stato quotato dall’ARPA nel 1999 e nel 2005 ed è stato recentemente inserito dall’IGM nella Rete Geodetica Nazionale di Livellazione di Alta Precisione (linea di raffittimento 169, caposaldo 038); partendo dalla quota ARPA2005 è stato possibile tarare i sensori mareografici (per mezzo di livellazione geometrica di alta precisione) in modo che forniscano un dato riferito al livello medio mare Genova 42;
- il sito offre un facile accesso (grazie alla banchina del Porto Canale) e presenza di corrente elettrica nelle immediate vicinanze (linea di corrente che alimenta il faro di segnalazione del Porto Canale).

Nel rispetto dei fattori descritti il sito individuato si trova quasi al termine del Porto Canale di Porto Garibaldi, lato nord, ad una distanza di circa 12 metri dalla banchina e presenta una colonna d’acqua di circa 3.5 m rispetto al livello medio mare presunto (figura 1a).

Il progetto è proseguito nel dimensionamento dei pali di fondazione, della cabina mareografica e della passerella di collegamento tra stazione e banchina del Porto Canale oltre naturalmente alla scelta di tutta la strumentazione da installare nella Stazione.

Particolare attenzione è stata posta al sostegno della struttura che è garantita da quattro pali di fondazione, della lunghezza complessiva di 18 m, infissi in sabbia per una profondità di circa 11.5 m (dei rimanenti 6.5 metri: 3.5 m risultano sommersi). In tal modo l’appoggio della stazione si troverà mediamente ad almeno +3.0 m rispetto al livello medio mare presunto e questo dovrebbe garantire un certo grado di sicurezza nei confronti del moto ondoso anche causato da mareggiate eccezionali. I pali sono tubolari in acciaio riempiti di calcestruzzo del diametro di circa 50 cm spessore 1.25 cm verniciati fuori opera con strati di resine protettive adatte all’ambiente marino. La cabina è costituita

da una cellula tridimensionale monoblocco di dimensioni 215x215x265 cm realizzata in calcestruzzo armato e vibrato ad alta resistenza. Nella pavimentazione sono stati predisposti, già nella fase di prefabbricazione, i fori per la sensoristica (vedi seguito) e nella copertura è stata installata la piastra di base per l'installazione dell'antenna GNSS.

Strumentazione installata

A partire dal febbraio 2009 nella Stazione Mareografica Integrata di Porto Garibaldi sono state installate le seguenti strumentazioni (scelte sulla base delle indicazioni IOC e tramite apposite indagini di mercato):

- sensore mareografico radar OTT Kalesto. Si tratta di un sensore che utilizza la tecnologia a microonde per la misura del livello di acque superficiali: il livello viene misurato dal sensore posizionato in sospensione sul pelo libero dell'acqua; la misura della distanza viene ottenuta come media di 40 campioni misurati ogni 0.4 secondi per una durata totale di misura pari a 17 secondi. Lo strumento ha dimensioni 560x160mm e pesa 8 kg. Il range di misura varia da un minimo di 1,5 m ad un massimo di 30 m con una precisione centimetrica garantita per un range di temperatura variabile da -40° a +80°. La quota di funzionamento del Kalesto è stata rialzata di circa 1.5 m rispetto alla pavimentazione della stazione per mezzo di un supporto in acciaio inossidabile. L'innalzamento del sensore è legato alla necessità di garantire la distanza focale minima affinché lo strumento sia in grado di effettuare la misura anche nella circostanza eccezionale che il livello del mare possa raggiungere la quota della pavimentazione della stazione; la misura di livello è stata impostata con un campionamento ogni 10 minuti;
- sensore mareografico a galleggiante OTT SE200 installato all'interno di apposito pozzo di calma: è composto da un sensore ad encoder con puleggia di rinvio del cavetto di sospensione del galleggiante. Il pozzo di calma è stato realizzato mediante tubolare in acciaio inox, chiuso all'estremità, fatta eccezione per un foro del diametro di 5mm. La risoluzione dello strumento, per un range di misura variabile da -20 a +20 m, è millimetrica. Rispetto al Kalesto, l'OTT SE200 può eseguire campionamenti a frequenze maggiori, minimo 1 minuto, in quanto è minore il tempo richiesto per la misura (circa 10 secondi); la misura di livello è stata impostata con un campionamento ogni 10 minuti. La presenza di un doppio sensore mareografico è sempre legata al rispetto delle indicazioni IOC: due sensori di livello, completamente indipendenti, garantiscono il dato nei confronti di eventuali malfunzionamenti di uno dei due sensori, ed inoltre, permettono di realizzare procedure di controllo reciproche sul corretto funzionamento degli stessi;
- sonda meteorologica: si tratta di una sonda montata su di un'asta portante con quattro diversi sensori: anemometro (velocità e direzione del vento), pluviometro digitale a bascula, termometro digitale (temperatura dell'aria), barometro digitale (pressione atmosferica);
- sonda multiparametrica Hydrolab DataSonde 5 è inserita all'interno di un apposito pozzo di protezione (diverso da quello dell'OTT SE200) ed è sostenuta per mezzo di una fune nautica. La testa della sonda presenta un corpo sensori per il monitoraggio della qualità dell'acqua (temperatura dell'acqua, salinità, pH, conducibilità, profondità sonda, ossigeno disciolto);
- tutti i dati dei sensori mareografici, della sonda meteo e della sonda multiparametrica vengono acquisiti per mezzo di datalogger OTT Logosens 2, e vengono inviati ogni 30' via modem GSM ad apposito server della Provincia di Ferrara;
- stazione permanente GNSS: è costituita da un ricevitore geodetico a doppia frequenza Topcon mod. NET-G3, alloggiato all'interno della cabina in un apposito armadio (con batterie tampone ed impianto di ventilazione), con antenna Chock Ring Topcon CR-G3 montata sul tetto della stazione mareografica. Il ricevitore e l'antenna, nonché la monumentazione del pilastro di sostegno, rispettano le specifiche EUREF ed IGS. Per la stazione permanente

GNSS è stato richiesto, ed è attualmente in fase di valutazione, l'inserimento nella rete EPN EUREF (www.epncb.oma.be/_trackingnetwork/proposed.php) con site name GARI. Allo stato attuale i dati vengono registrati ogni 30" ed i file giornalieri vengono scaricati via modem GSM tramite apposito software (MeridianaSatEnterprise) installato presso un server del Dipartimento di Ingegneria di Ferrara (ENDIF, *Operational Centre*); i files giornalieri, trasformati in formato Rinex compressi (Hatanaka) vengono inviati via ftp all'ASI (Agenzia Spaziale Italiana, *EPN local data centre*) ed all'OLG (*Observatory Lustbuehel Graz, EPN Regional Data Centre*).

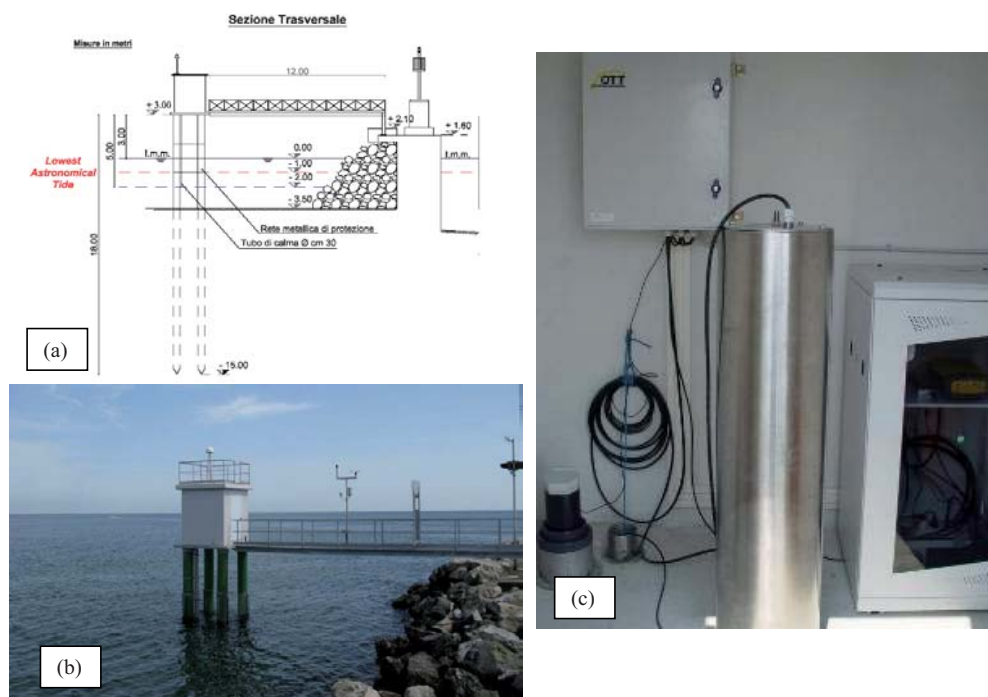


Figura 1 – (a) sezione di progetto della Stazione Mareografica Integrata di Porto Garibaldi, in evidenza il valore del Lowest Astronomical Tide considerato; (b) immagine della stazione terminata nei primi mesi del 2009, è visibile l'antenna GNSS sul tetto e la sonda meteo sulla passerella; (c) interno della stazione: in primo piano il cilindro in acciaio inox che contiene il sensore mareografico radar mod. OTT Kalesto, in basso a sinistra il tubo di calma per il sensore mareografico a galleggiante con encoder mod. OTT SE200, e poco a destra il tubo dove è calata la sonda multiparametrica, a destra nell'immagine, l'armadio con il ricevitore GNSS Topcon Net-G3

Procedura di controllo e di elaborazione dei dati dei sensori mareografici

La procedura di controllo di qualità e di elaborazione dei dati di livello della Stazione Mareografica Integrata di Porto Garibaldi è stata messa a punto seguendo sia le indicazioni IOC sia le indicazioni fornite dai principali organismi che operano nel settore, tra i quali ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), che gestisce in Italia la Rete Mareografica Nazionale (RMN). Tale procedura può essere suddivisa in 3 blocchi principali ognuno dei quali comprende al proprio interno diverse elaborazioni applicate in cascata sui dati acquisiti. Sinteticamente si ha:

- 1) Controllo dei dati grezzi registrati dalla stazione. In sequenza si procede al: controllo delle date assegnate dallo strumento ai diversi livelli; controllo delle eventuali lacune nelle registrazioni (valori dei livelli mancanti); ricerca dei livelli fuori scala; ricerca dei picchi; ricerca dei valori costanti; ricostruzione, mediante interpolazione, delle brevi lacune di registrazione;

- 2) Elaborazione dei dati grezzi per il filtraggio dei livelli orari (dai dati campionati ogni 10 minuti ai dati orari) e per il calcolo dei livelli medi giornalieri, mensili ed annuali;
- 3) Analisi armonica dei dati di marea per il calcolo delle costanti di marea necessarie per la previsione e il calcolo dei residui.

Nel seguito viene presentata una descrizione dettagliata solo per la parte di elaborazione/filtraggio dei dati grezzi dei sensori mareografici (blocco 2), rimandando ad altre pubblicazioni gli altri aspetti della procedura.

Determinazione dei livelli orari e dei livelli medi giornalieri, mensili, annuali

I livelli orari vengono estratti dalla serie delle osservazioni ma solo dopo che a queste ultime sia stato applicato un opportuno filtro in frequenza passa-basso. L'applicazione del filtro è importante perché permette di ridurre gli errori di "aliasing" che si avrebbero nel passaggio dalla serie completa (con un dato ogni 10') alla serie di dati orari necessari per il calcolo dei livelli medi, giornalieri, mensili ed annuali, nonché per il calcolo delle armoniche di marea.

Per passare da un campionamento di 10 min ad un campionamento orario, eliminando pertanto 5 dati ogni 6 (procedura di "decimazione"), e passando così da una frequenza f_c di $1.67 \cdot 10^{-3}$ Hz ad una frequenza f'_c di $2.78 \cdot 10^{-4}$ Hz, si possono presentare errori nella ricostruzione del segnale. In particolare, tali errori si verificano se lo spettro del segnale originario presenta delle componenti a frequenze superiori la frequenza f_n di Nyquist pari alla metà della frequenza di campionamento del segnale che si vuole ottenere. Nel nostro caso, pertanto, volendo ottenere dei dati orari, è necessario eliminare le componenti in frequenza del segnale che si trovano ad una frequenza maggiore di:

$$f_n = \frac{f'_c}{2} = 1.39 \cdot 10^{-4} \text{ Hz} \quad [1]$$

Il filtro in frequenza utilizzato è un filtro passa-basso di Butterworth (Hodnesdal H., 2006) del secondo ordine la cui risposta in frequenza è definita in funzione della frequenza di taglio f_{cut} secondo la seguente espressione:

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{[1 + (f / f_{\text{cut}})]^{2N}}} \quad [2]$$

dove la frequenza di taglio f_{cut} (cut-off frequency) rappresenta la frequenza alla quale il filtro dimezza l'energia del segnale, ovvero alla quale la risposta in ampiezza $|H(f)|$ è pari a $1/\sqrt{2}$, mentre N rappresenta l'ordine del filtro (nel nostro caso 2).

La frequenza di taglio utilizzata nel nostro caso è quella corrispondente ad un periodo di 3 ore:

$$f_{\text{cut}} = \frac{1}{3 \cdot 3600} = 9.26 \cdot 10^{-5} \text{ Hz} \quad [3]$$

Il filtro viene applicato al campione dei dati due volte in cascata, in avanti e indietro nel tempo (algoritmo zero-phase di MATLAB), ottenendo così un filtro finale del quarto ordine che elimina lo sfasamento nel tempo del segnale filtrato rispetto a quello di base.

A questo punto, dopo aver filtrato i dati di livello è possibile estrarre i livelli orari tramite semplice "decimazione".

Il livello medio giornaliero viene calcolato sulla base dei livelli orari applicando un ulteriore filtro il cui compito è quello di eliminare il contributo delle componenti diurne e semidiurne della marea. Il filtro utilizzato è il filtro X0 di Doodson: un filtro simmetrico applicato direttamente in dominio tempo sui dati orari, e centrato sulla dodicesima ora del giorno considerato. Il livello medio giornaliero viene pertanto calcolato secondo la seguente espressione:

$$L_{giorno}(T) = \frac{\sum_{i \in \mathbb{Z}^9} L_{ora}(T \otimes i) \cdot F(i)}{\sum_{i \in \mathbb{Z}^9} F(i)} \quad [4]$$

$$F(i) \in \{2, 1, 1, 2, 0, 1, 1, 0, 2, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1\}^\# \quad , F(\otimes) \in F(i) \quad , F(0) \in \{0$$

dove il termine L_{giorno} rappresenta il livello medio giornaliero del giorno considerato (T), calcolato come media pesata dei 19 livelli precedenti e successivi in base ai pesi del filtro $F(i)$.

Affinché il livello giornaliero sia finito, è necessario, ovviamente, che tutti i livelli sommati siano finiti, in caso contrario il livello calcolato risulterà NaN (Not-a-Number). Per questo motivo è stato introdotto un meccanismo decisionale all'interno dell'algoritmo di calcolo al fine di trattare i livelli orari NaN che eventualmente si presentassero. In particolare, la finestra temporale che compete al filtro viene suddivisa in 4 parti uguali, e la condizione che deve essere verificata è che in ogni quarto di essa sia presente almeno un livello orario finito di peso non nullo. Se questa condizione è rispettata, allora la media viene applicata ai soli livelli finiti, con la conseguenza che tutti i pesi dei livelli non finiti vengono eliminati dalla normalizzazione. Se queste condizioni non vengono rispettate, il livello medio giornaliero non viene calcolato ma viene indicato con NaN.

Il livello medio mensile viene calcolato come semplice media aritmetica dei livelli medi giornalieri definiti al passo precedente. Il livello viene ovviamente calcolato considerando solo i livelli giornalieri finiti, mentre quelli NaN non vengono considerati nel calcolo. La media viene calcolata solo se all'interno del generico mese preso in esame i livelli giornalieri finiti (NaN) sono al massimo 6; se sono maggiori o uguali a 7 il livello mensile non viene calcolato e viene indicato come NaN. Infine, il livello medio annuo viene calcolato come media pesata dei livelli medi mensili, per ognuno dei quali il peso da utilizzare è dato dal numero di livelli giornalieri finiti contenuti all'interno del mese stesso. Ovviamente il calcolo viene effettuato solo per i livelli mensili disponibili (finiti). La media viene applicata solo se si hanno almeno 11 livelli medi mensili finiti; in caso contrario il livello annuo non viene calcolato ma viene indicato come NaN.

Conclusioni

In questo lavoro è stata presentata la nuova Stazione Mareografica Integrata di Porto Garibaldi della Provincia di Ferrara. Sono stati illustrati la stazione, i sensori installati e la procedura di elaborazione dei dati dei sensori di livello. Il controllo di qualità e il calcolo delle componenti armoniche di marea verrà presentato in una prossima pubblicazione. E' in fase avanzata la richiesta di inserimento della Stazione nella rete EPN EUREF (*site name* GARI) proprio in virtù della collocazione con altra rilevante strumentazione. In futuro si intende proporre l'inserimento di GARI nei progetti TIGA (*Tide Gauge Benchmark Monitoring*) e ECGN (*European Combined Geodetic Network*).

Bibliografia

- EPN Central Bureau, Procedure for becoming an EPN Station, EUREF, 2006, (www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/);
- EPN Central Bureau, Guidelines for EPN Station and Operational Centres, EUREF, 2007, (www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/);
- Hodnesdal H. (2006), Use of Butterworth filter for lowpass filtering of water level data in Norwegian Hydrographic Service, Notat 04-3 Norwegian Hydrographic Service (NHS);
- IOC (International Ocean Commission) – UNESCO - Manuals and Guides 14, Manual on Sea Level, Measurement and Interpretation, Vol. I: basic procedures, 1985; Vol. II: Emerging technologies, 1994; Vol. III: reappraisals and recommendations as of the year 2000, 2002; Vol. IV: an update to 2006, 2006;
- Luise M., Vitetta G.M., 2003, Teoria dei segnali, McGraw-Hill, Milano.