

Università degli studi di Firenze

Facoltà di Ingegneria



Corso di Laurea in Ingegneria Ambiente e  
Territorio

Tesi di Laurea

Anno Accademico 2009/2010

Valutazione della disponibilità energetica dei moti  
ondosi per l'Alto Tirreno

Candidato: Riccardo Benifei

Relatore: Lorenzo Cappietti

# Indice

<b>Indice delle figure</b> .....	<b>3</b>
<b>Sommario</b> .....	<b>6</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Descrizione delle onde di mare</b> .....	<b>15</b>
1.1. Il moto ondoso.....	15
1.2. Altezza e periodo di un'onda .....	17
1.3. Osservazioni visive e misure sperimentali .....	20
<b>2. Analisi spettrale</b> .....	<b>21</b>
2.1. Lo spettro d'onda .....	21
2.2. Modelli spettrali .....	27
2.3. La trasformata di Fourier.....	28
2.4. Spettro in frequenza direzionale.....	33
<b>3. Energia e potenza del moto ondoso</b> .....	<b>37</b>
3.1. Energia e potenza del moto ondoso.....	37
<b>4. Valutazione della potenza del moto ondoso nell'Alto Tirreno</b> .....	<b>41</b>
4.1. Che cosa è un file Netcdf .....	41
4.2. Valutazione della potenza del moto ondoso nell'Alto Tirreno .....	41
4.3. Valutazione delle potenze disponibili in vari siti portuali costieri.....	49
<b>Conclusioni</b> .....	<b>52</b>
<b>Appendice A</b> .....	<b>53</b>
<b>Appendice B</b> .....	<b>58</b>
<b>Appendice C</b> .....	<b>63</b>
<b>Bibliografia e Sitografia</b> .....	<b>68</b>

# Indice delle figure

Fig. 1- Esempio di AWS.....	9
Fig. 2 – Sistema Pelamis.....	9
Fig. 3 – Impianto Limpet.....	10
Fig. 4 - Centrale elettrica alimentata dalle correnti di marea, Strangford Lough.....	12
Fig. 5 - Progetto Fri-El Sea Power.....	13
Fig. 6 - Downward e upward crossing.....	18
Fig. 7 - Altezza e periodo d'onda.....	19
Fig. 8 - Relazione tra $H_{13}$ e $H_v$ e tra $T_{13}$ e $T_v$ .....	20
Fig. 9 - Superficie del mare schematizzata come somma di onde armoniche.....	21
Fig. 10 - $\eta(t)$ , ampiezza, fase.....	22
Fig. 11 - Amplitude spectrum.....	23
Fig. 12 - Amplitude spectrum.....	23
Fig. 13 - Variance spectrum.....	24
Fig. 14 - Variance density spectrum (discontinuous).....	24
Fig. 15 - Variance density spectrum.....	24
Fig. 16 - $\Delta var$ della banda di frequenza $\Delta f$ .....	25
Fig. 17 - Delta-function, narrow spectrum, wide spectrum.....	26
Fig. 18 - Valori delle costanti che compaiono nel modello a due parametri.....	28
Fig. 19 - La risoluzione di frequenza $\Delta f = 1/D$ rimuove dettagli dallo spettro.....	30
Fig. 20 - Lo spettro "grezzo" appare "appuntito" perché la variance density è stimata da una sola ampiezza per frequenza.....	31
Fig. 21 - Lo spettro quasi-ensemble averaged.....	32
Fig. 22 – Intervalli fenomeno dell'aliasing.....	32
Fig. 23 - La superficie del mare vista come somma di un gran numero di componenti di onde armoniche.....	33
Fig. 24 - Spettro bidimensionale.....	35
Fig. 25 - Il contributo $\Delta var$ in uno spettro bidimensionale ( $\Delta f, \Delta \omega$ ) rispetto alla total variance.....	36
Fig. 26 - Schematizzazione onda.....	37

Fig. 27 - Potenza (W/m) del 2 luglio dell'anno 2009 alle ore 15.00 .....	45
Fig. 28 - Potenza media(W/m) del mese di LUGLIO 2009 .....	46
Fig. 29- Potenza media(W/m) del mese di LUGLIO 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure .....	46
Fig. 30 – Potenza media (W/m) dei dieci mesi di disponibilità dei dati .....	47
Fig. 31 – Potenza media(W/m) dei dieci mesi di disponibilità dei dati, dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure .....	48
Fig. 32 - Istogramma delle potenze mensili del punto del mediterraneo maggiormente energetico.....	49
Fig. 33 - Latitudine e longitudine dei dieci siti .....	49
Fig. 34 - Posizione geografica dei dieci siti .....	50
Fig. 35 – Diagramma delle potenze medie mensili dei dieci siti.....	51
Fig. 36 - Istogramma delle potenze medie dei dieci mesi di disponibilità energetica dei dieci siti .....	52
Fig. 37 – Potenza media(W/m) del mese di LUGLIO 2009.....	53
Fig. 38 - Potenza media(W/m) del mese di AGOSTO 2009 .....	53
Fig. 39 - Potenza media(W/m) del mese di SETTEMBRE 2009 .....	54
Fig. 40 - Potenza media(W/m) del mese di OTTOBRE 2009 .....	54
Fig. 41 - Potenza media(W/m) del mese di NOVEMBRE 2009 .....	55
Fig. 42 – Potenza media(W/m) del mese di DICEMBRE 2009 .....	55
Fig. 43 - Potenza media(W/m) del mese di GENNAIO 2010 .....	56
Fig. 44 - Potenza media(W/m) del mese di FEBBRAIO 2010.....	56
Fig. 45 - Potenza media media(W/m) del mese di MARZO 2010 .....	57
Fig. 46 - Potenza media(W/m) del mese di APRILE 2010 .....	57
Fig. 47 - Potenza media(W/m) del mese di LUGLIO 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure .....	58
Fig. 48 - Potenza media(W/m) del mese di AGOSTO 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure.....	58
Fig. 49 - Potenza media(W/m) del mese di SETTEMBRE 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure.....	59
Fig. 50 – Potenza media(W/m) del mese di OTTOBRE 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure .....	59
Fig. 51 - Potenza media(W/m) del mese di NOVEMBRE 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure .....	60
Fig. 52 - Potenza media(W/m) del mese di DICEMBRE 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure .....	60
Fig. 53 - Potenza media(W/m) del mese di GENNAIO 2010 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure.....	61
Fig. 54 - Potenza media(W/m) del mese di FEBBRAIO 2010 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure .....	61

Fig. 55 - Potenza media(W/m) del mese di MARZO 2010 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure .....	62
Fig. 56 - Potenza media(W/m) del mese di APRILE 2010 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure.....	62
Fig. 57 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Genova.....	63
Fig. 58 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Chiavari .....	63
Fig. 59 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Carrara .....	64
Fig. 60 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Viareggio .....	64
Fig. 61 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Pisa .....	65
Fig. 62 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Livorno .....	65
Fig. 63 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Vada.....	66
Fig. 64 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Piombino.....	66
Fig. 65 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Castiglione della Pescaia .....	67
Fig. 66 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Marina di Grosseto .....	67

# Sommario

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è di valutare la potenza media dei dieci mesi di disponibilità dei dati (da luglio 2009 ad aprile 2010) e le potenze medie mensili del moto ondoso nella zona del Mar Mediterraneo Nord-Ovest. Per fare questo è stato fatto riferimento ai dati forniti dal polo Oceanografico costiero PREVIMER [ 8 ] , con sede a Brest (Francia), il quale si occupa di produrre in continuo analisi e previsioni sullo stato dello sviluppo marino sui tre fronti francesi della Manica, dell'Atlantico e del Mediterraneo. Nel primo capitolo viene spiegato come si forma un moto ondoso e sono descritte le caratteristiche fondamentali di un'onda. Nel secondo capitolo si accenna all'analisi spettrale dei moti ondosi. Nel terzo capitolo, partendo dall'energia cinetica e potenziale di una singola onda, dopo vari passaggi, viene fornita l'espressione della potenza. Nel quarto capitolo viene introdotto il formato dei file Netcdf e calcolate, attraverso l'uso di Matlab, la potenza media dei dieci mesi di disponibilità dei dati e le potenze medie mensili. Le conclusioni sono esposte nel capitolo cinque.

## Introduzione

Proteggere l'ambiente è l'imperativo mondiale al giorno d'oggi, per fare questo è fondamentale uno stile di vita più sostenibile, riducendo le emissioni dei gas che favoriscono l'effetto serra. Sfruttare l'energia delle onde in mare aperto per produrre energia elettrica, è un modo, tra altri, per coniugare l'esigenza di produrre energia con la necessità di rispettare l'ambiente. L'energia delle onde, che si formano dal progressivo trasferimento di energia dal vento che soffia sulla superficie dell'acqua, è una fonte di energia classificata tra le cosiddette "energie rinnovabili" e il suo sfruttamento può offrire nuove opportunità di lavoro nel settore delle costruzioni e delle manutenzioni . Il mare costituisce una sorgente di energia pulita, sfruttata finora solo in minima parte, che, insieme ad altre fonti, può contribuire alla domanda energetica mondiale. L'energia ricavabile dal mare può essere suddivisa in diverse tipologie, a cui corrispondono differenti soluzioni tecnologiche:

- energia mareomotrice
- energia dal moto ondoso

- energia dal gradiente termico oceanico
- energia dalle correnti sottomarine.

### Energia mareomotrice

E' risaputo che la forza di attrazione gravitazionale della Luna è causa del fenomeno delle maree, che si manifesta con regolari e periodici abbassamenti e innalzamenti di enormi masse d'acqua. Meno noto è il fatto che, utilizzando i dislivelli tra alta e bassa marea, è possibile produrre energia elettrica. Gli impianti mareomotrici sono caratterizzati da grandi dimensioni, dalla presenza di importanti opere di sbarramento delle acque (dighe, chiuse) e di un bacino di accumulo. La produzione di energia elettrica avviene grazie a delle turbine idrauliche. Il funzionamento di questi impianti si può dividere in due fasi:

- nella fase di alta marea, l'apertura delle chiuse permette il riempimento del bacino di accumulo
- nella fase di bassa marea, il rilascio controllato dell'acqua contenuta nel bacino assicura l'erogazione di notevoli quantitativi di energia, in maniera simile a quanto accade nei grandi impianti idroelettrici.

Le turbine funzionano in entrambe le direzioni, sia con l'acqua in ingresso che con l'acqua in uscita. I maggiori limiti delle centrali mareomotrici sono nell'elevato impatto ambientale, in termini di realizzazione di infrastrutture di grandi dimensioni e di rischi per l'erosione delle coste. Un modo meno impattante per utilizzare l'energia mareomotrice consiste nello sfruttare le correnti sottomarine causate dalle maree. In questa maniera, è possibile realizzare impianti parzialmente o totalmente immersi in acqua e privi di opere di sbarramento.

Nel gennaio 2010 il governo inglese ha annunciato la propria intenzione di avviare un importante progetto per estrarre energia dalle maree del fiume Severn. L'estuario del Severn, sulla costa britannica, vede alcune delle maggiori escursioni di marea del mondo e la sua lunga e stretta forma causa un'escursione che arriva a più di 13 metri. L'opzione più probabile è che venga costruita una diga gigante di 16 chilometri attraverso l'estuario. Proposto già 35 anni fa, lo sbarramento integrale, intrappolerebbe più di 400 chilometri quadrati di estuario dietro a un muro di cemento e sabbia. Con il salire della marea, le chiuse potrebbero essere aperte lasciando entrare l'acqua, con l'alta marea le cancellate

verrebbero chiuse e l'acqua che scorre verso valle verrebbe forzata attraverso le turbine. La capacità di generazione teorica della diga, al suo picco, sarebbe di 8,6 gigawatt abbastanza per fornire il cinque per cento dell'elettricità del Regno Unito e 35 volte la capacità del più grande impianto esistente del genere, quello sull'estuario del Rance, in Francia.

Come detto in precedenza, questi grandi impianti producono un notevole impatto ambientale. L'impianto sul fiume Severn infatti provocherebbe una marea più alta di circa 5 metri rispetto a prima e la maggior parte della zona interditale sarebbe permanentemente allagata, compresi i 190 chilometri quadrati di habitat che, durante l'inverno, ospita circa 70000 uccelli. Lo sbarramento impedirebbe anche la migrazione delle anguille e dei salmoni [ 4 ].

### Energia dal moto ondoso

Tra tutte le forme di energia dal mare, quella dal moto ondoso è senza dubbio quella studiata da più tempo e che conosce il maggior numero di sperimentazioni, soluzioni e prototipi impiantistici. Il moto ondoso, provocato dall'effetto del vento sulla superficie del mare, è caratterizzato da un'alta densità energetica e la sua potenza viene misurata in kW per metro di fronte ondoso. Rispetto all'energia mareomotrice, quella dal moto ondoso presenta il vantaggio di adottare soluzioni tecnologiche a basso impatto ambientale. Anche gli investimenti economici richiesti sembrano essere contenuti, nonostante manchi ancora una produzione serializzata dei principali componenti impiantistici e quindi un'economia di scala in grado di ridurre i costi specifici. Inoltre ci sono alcune difficoltà non pienamente risolte, legate soprattutto all'irregolarità tipica del moto ondoso, che in caso di eventi estremi, potrebbe portare al danneggiamento degli impianti. Esistono diverse tecnologie di sfruttamento del moto ondoso, ne presento alcune tra le più promettenti:

#### *Sistemi con impianti sommersi*

Un esempio è l'AWS (Archimedes Wave Swing, Fig.1), costituito da un pistone sommerso che, utilizzando aria, si espande e si contrae sfruttando il cambiamento di pressione idrostatica dovuta al passaggio delle onde. Il movimento relativo delle due parti del congegno viene convertito in elettricità grazie ad un generatore lineare. E' stato avviato nell'ottobre del 2004 al largo di Viana do Costella in Portogallo, dovrà comunque essere testato per un certo tempo prima di diventare un prodotto commerciale [ 6 ].

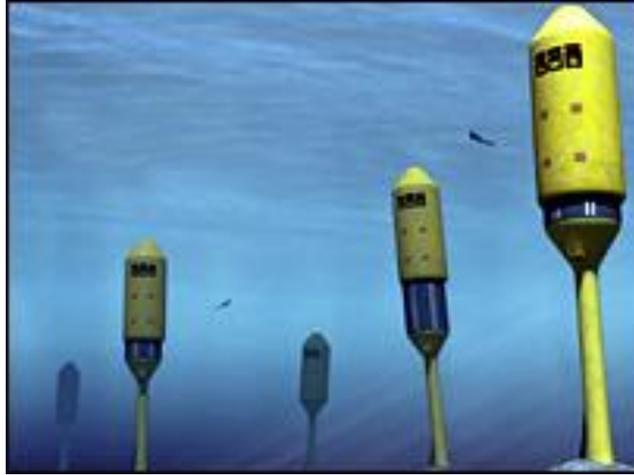


Fig. 1- Esempio di AWS

### *Sistemi con apparati galleggianti*

Un esempio è il così detto Pelamis, prodotto dalla società scozzese Ocean Power Delivery. L'installazione, realizzata a qualche miglio dalla costa di Agucadoura, una città situata a nord della capitale portoghese, è basata da moduli composti da 4 cilindri di diametro di circa 4 metri e lunghi 180 metri, collegati tra loro attraverso giunti. L'installazione è in grado di produrre 750kW di energia e provvede alla fornitura di energia di circa 500 abitazioni. I moduli sono ancorati al fondale e posti in galleggiamento con asse ortogonale alle creste delle onde (Fig. 2). Grazie al moto relativo dei corpi cilindrici, una pompa mette in pressione l'olio contenuto nei tubi che viene utilizzato per attivare generatori di energia elettrica. I maggiori problemi di questa tecnologia sono dovuti all'occupazione di superficie marina, potenzialmente pericolosa per la navigazione [ 7 ].

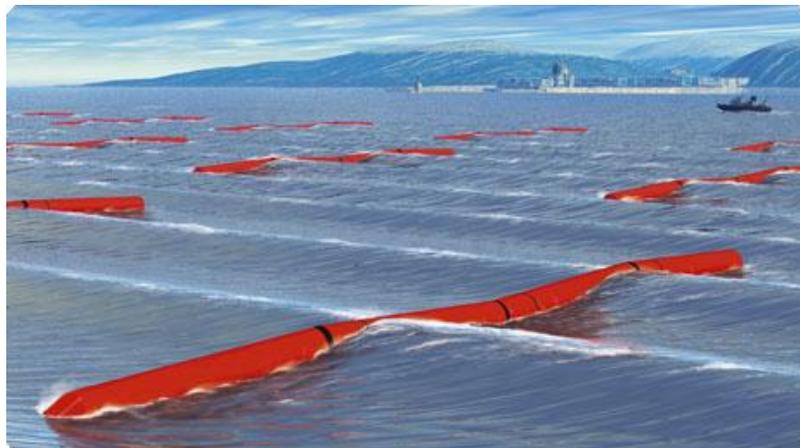


Fig. 2 – Sistema Pelamis

## *Sistemi OWC*

Si tratta di una soluzione tecnologica molto interessante, che sfrutta il principio della colonna d'acqua oscillante: l'OWC (Oscillating Water Column). I sistemi OWC sono formati da strutture in acciaio o calcestruzzo, in parte immerse in mare. Anche se normalmente vengono realizzati nei pressi della linea di costa, possono anche essere installati su piattaforme off-shore, per sfruttare la maggiore potenza delle onde al largo delle coste. L'energia elettrica si ottiene grazie a un processo di tipo pneumatico, abbinato al particolare principio di funzionamento delle turbine Wells. L'onda ascendente provoca una compressione d'aria all'interno della camera in cui è installata la turbina, mettendola in rotazione. L'onda discendente provoca invece una decompressione, che anch'essa mette in moto la turbina. La particolarità della turbina Wells consiste nel fatto che, pur funzionando con due flussi d'aria in direzioni opposte (compressione e decompressione), il suo senso di rotazione non cambia. I principali svantaggi di questa tecnologia sono dati dall'impatto visivo e dalla rumorosità della turbina.

La praticabilità tecnica di un impianto OWC fu dimostrata in Gran Bretagna grazie ad un prototipo da 75kW progettato dalla Queens University di Belfast. Questo progetto fu commissionato nel 1991 ed ha operato come progetto di ricerca per otto anni alla fine di cui fu de-commissionato nel 1999. Lo sviluppo del prototipo da 75kW fu chiamato impianto Limpet (Fig.3) e fu costruito sull'isola scozzese di Islay [ 10 ].



Fig. 3 – Impianto Limpet

### Energia dal gradiente termico oceanico

Sfruttare il gradiente termico oceanico significa sfruttare la differenza di temperatura tra le acque marine superficiali e le acque marine profonde. Un gradiente termico di 20 °C è sufficiente per produrre energia elettrica in maniera economicamente conveniente, utilizzando la tecnologia OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion).

Il calore delle acque superficiali fa evaporare il liquido di lavoro (ammoniaca o acqua), fungendo così da sorgente calda per l'alimentazione di un ciclo a vapore, con turbina e generatore elettrico. Le acque di profondità aspirate dal fondo fungono da sorgente fredda, che raffredda i vapori e li fa tornare allo stato liquido, chiudendo così il ciclo. Esistono alcuni impianti operativi, caratterizzati però da basse potenze e da elevati costi di realizzazione. Possono essere realizzati lungo le coste oppure su piattaforme galleggianti.

### Energia dalle correnti sottomarine

Tra tutte le forme di energia dal mare, quella dalle correnti sottomarine presenta le maggiori potenzialità nel medio-lungo termine. Le turbine per lo sfruttamento delle correnti marine possono essere ad asse orizzontale, più adatte alle correnti marine costanti, e ad asse verticale, più adatte alle correnti di marea perché cambiano direzione più volte nell'arco della giornata.

A Strangford Lough, in Irlanda del Nord, da luglio 2008 è in funzione la prima centrale elettrica alimentata dalle correnti di marea (Fig.4). Dopo una prima fase sperimentale durata alcuni mesi, ora, la centrale, con una potenza installata di 1,2 MW, può soddisfare il fabbisogno di energia di circa 1.000 abitazioni [ 9 ].

L'assenza di sbarramenti e di infrastrutture impattanti, grazie alla parziale o totale immersione in acqua delle turbine, riducono al minimo l'impatto ambientale di questi impianti.

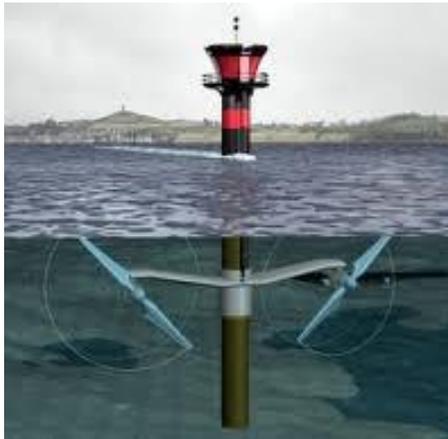


Fig. 4 - Centrale elettrica alimentata dalle correnti di marea, Strangford Lough

Osservando che la maggior parte di questi progetti sono realizzati in zone di costa che si affacciano sull'Oceano, dove le altezze d'onda sono rilevanti e le maree sono notevoli, si potrebbe pensare che in Italia non sia possibile ricavare energia dal moto del mare in modo conveniente. Progetti, come quello che è stato sviluppato dalla società Fri-El Green Power e dal dipartimento di ingegneria aerospaziale dell'Università di Napoli Federico II, dimostrano l'esistenza di un certo interesse a sfruttare l'energia del mare anche in Italia. La società Fri-El Green Power ha sede a Bolzano ed è attiva nel campo dell'energia pulita; progetta, realizza e gestisce impianti per la produzione e l'impiego di energia elettrica rinnovabile. Il progetto (Fig.5), denominato Fri-El Sea Power, sarà composto da una struttura galleggiante (portone o nave) e da varie turbine ad asse orizzontale posizionate ad intervalli regolari lungo un tubo snodabile e modulare (denominato "filare"). Il tubo sarà in grado di allinearsi alla corrente marina, seguendone l'eventuale variazione, fungendo da albero di trasmissione del moto che trasferisce la potenza catturata dal moto dell'acqua al generatore elettrico. L'energia elettrica prodotta verrà immessa direttamente nella rete elettrica attraverso un cavo sottomarino che collega le singole strutture galleggianti alla terra ferma. Le strutture galleggianti, ovvero i pontoni e le navi, possono essere disposte in gruppi di diverse decine, formando delle vere e proprie flotte impiegate nella produzione energetica. Un prototipo da 500 kW, che sarà testato in mare nello Stretto di Messina, dove la corrente raggiunge punte di 2.5 metri al secondo, sarà costituito da una nave e da 4 filari allineati, ognuno dei quali avrà 5 turbine del diametro di 4 metri per un totale di 20 turbine [ 5 ]. Il progetto Fri-El Sea Power prevede, poi, un ulteriore livello di sviluppo. Quando la tecnologia della produzione energetica da idrogeno avrà raggiunto il suo grado di maturità, Fri-El Sea Power potrà essere utilizzato per la produzione di idrogeno.

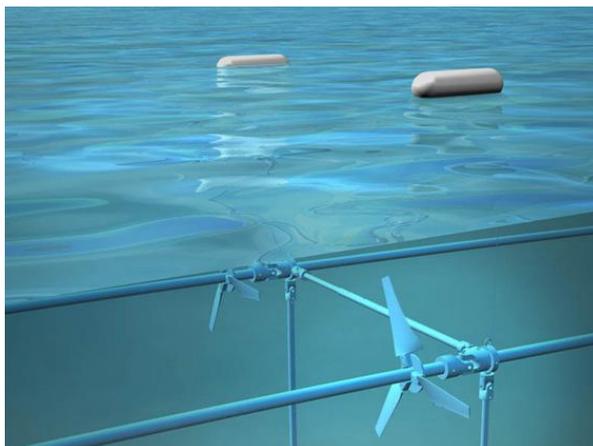


Fig. 5 - Progetto Fri-El Sea Power

### Impatto ambientale dei dispositivi per la produzione di energia da onde e da maree

Anche se i cambiamenti climatici e la necessità di produrre energia “pulita” e “verde” forniscono una spinta fondamentale per lo sviluppo di impianti per la produzione di energia da onde e da maree, bisogna considerare l’impatto ambientale di questi impianti. Questo riguarda i cambiamenti fisici e socio-ambientali che possono prodursi in prossimità di impianti in acque costiere o oceaniche, vi sono diversi fattori di cui tenere di conto: rotte navali e mercantili, sicurezza delle navi, movimenti in mare di natura militare, sicurezza dei rifornimenti, mutamenti nel moto ondoso e nella mobilità dei sedimenti, posizionamento dei cavi di collegamento alla rete elettrica, pesca. In particolare si dovrà risolvere problemi come:

- danni ai fondali prodotti dalla costruzione e dismissione degli impianti;
- interazioni elettromagnetiche con i pesci da parte dei cavi sottomarini;
- distruzione del fondale scavato nel caso in cui i cavi siano sotterrati;
- il dislocamento di strutture, fondazioni e impianti nel flusso delle correnti può influire sulla velocità del flusso stesso sia a livello locale che globale;
- l’erosione o deposito di sedimenti possono incrementare quanto ridurre i flussi locali e globali, con conseguente ulteriore impatto. Le abitudini alimentari e riproduttive della fauna e della flora possono subire l’influenza di questi cambiamenti;

- le turbine rotanti degli impianti possono potenzialmente ferire mammiferi marini e pesci, anche se con impianti di grandi dimensioni il rischio è minimo a causa della velocità di rotazione ridotta delle turbine;
- gli impianti costieri, o le stazioni ausiliarie per gli impianti in alto mare, possono avere un notevole impatto visivo e paesaggistico;
- lo sviluppo di impianti per la produzione di energia elettrica dal moto ondoso e dalle maree potrebbe comportare la creazione di zone di divieto di pesca. Un vantaggio di tale restrizione, dall'altra parte, potrebbe consistere nella creazione di un habitat ideale per la riproduzione e la crescita di specie marine in aree protette dallo sfruttamento.

Questi elementi devono essere considerati sia su scala locale che su scala globale, pertanto è necessaria una programmazione specifica per l'individuazione di aree di "non sviluppo", che tutti i Paesi dovranno affrontare se desiderano avvalersi delle tecnologie per lo sfruttamento dell'energia del moto ondoso e delle maree [ 4 ].

Dopo aver descritto alcuni modi per ricavare energia dal mare e delle sue problematiche, prendendo in considerazione l'energia dal moto ondoso, verrà fatta una valutazione della potenza media dei dieci mesi di disponibilità dei dati nella zona del Mar Mediterraneo Nord-Ovest e più nel particolare nell'Alto Tirreno e nel mar Ligure (cap.4), che può servire per eventuali valutazioni per produrre energia elettrica dal moto ondoso. Sicuramente, come abbiamo già accennato, questi impianti in Italia avranno uno "sviluppo difficile" ma non è detto che, in un futuro prossimo, con un aumento dell'interesse e un maggior mercato tecnologico, si possa pensare a soluzioni di questo tipo.

# 1. Descrizione delle onde di mare

## 1.1. Il moto ondoso

Il moto ondoso è un fenomeno naturale originato da una perturbazione dello stato di quiete del mare che si propaga nello spazio provocando un'oscillazione della superficie e della sua altezza. Questo movimento può essere dovuto a vari tipi di fenomeni:

- fenomeni stocastici, non sempre presenti, come venti, sismi, frane ecc. Tra questi il fenomeno più frequente è la presenza di vento che da origine alle così dette seawaves o wind waves; le onde da vento sono, quindi, dovute all'interazione tra atmosfera e idrosfera, ed hanno un'energia tale da renderle le più rilevanti;
- fenomeni perenni, come le maree. Le onde di marea sono in genere poco energetiche in quanto molto lunghe e lente, la cui oscillazione può durare anche delle ore.

### Formazione dei venti

La radiazione solare riscalda la superficie della Terra e l'atmosfera in modo diverso: ai tropici l'aria risulta più calda rispetto a quella dei poli, si genera quindi un gradiente di pressione con conseguente spostamento delle particelle d'aria verso l'equatore. A questo moto principale si aggiungono delle componenti deviatoriche dovute alla forza di Coriolis: questa si origina nel sistema non inerziale della Terra a causa della sua rotazione attorno all'asse. Il vento viene generato dall'energia solare, perciò si può affermare che le onde non sono altro che energia solare trasferita e trasportata dal mare.

### Interazione vento-mare

La superficie del mare in quiete è orizzontale, ogni particella è soggetta ad una forza peso  $F=mg$  equilibrata dalla spinta di Archimede. Lo stato di quiete viene perturbato dal vento che applica la forza direttamente sulla superficie liquida. Per il principio di aderenza, una particella a contatto con un'altra particella in quiete è anch'essa in quiete, nel momento in cui il vento inizia a soffiare si genera una fascia prossima al contorno superficie del mare-aria all'interno della quale la velocità varia dallo zero ad un valore di regime: questa fascia

è detta strato limite atmosferico, la cui altezza solitamente viene approssimata a 10 m. Un fluido come l'acqua, al contrario di un solido, si deforma sotto l'azione di taglio indotta dal vento: questa deformazione si manifesta come uno scorrimento di uno strato di fluido ed una leggera incurvatura della superficie libera che dà origine ai cosiddetti ripples, all'aumentare del vento le forme dei ripples vengono esasperate. Considerando che lungo la linea di flusso si conserva il trinomio di Bernoulli:  $H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{u^2}{2g}$ , si nota che sulla

cresta, la zona più alta dell'onda, si ha una velocità limite ed elevata  $u$ , mentre sul cavo, la zona più bassa, la velocità è trascurabile rispetto ad  $u$ . Per cui si ottiene:  $(z_1 - z_2) + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g}$   
 $= \frac{P_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} \approx 0 = \frac{P_2}{\gamma}$

$z_1 - z_2 \approx 10^{-3}$  può essere trascurato

$\frac{P_1}{\gamma} \approx 10$  m dall'esperienza di Torricelli

$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} \rightarrow P_2 > P_1$ , per cui il cavo viene spinto sempre più verso il basso e la forma del ripple si esaspera.

L'alternanza tra alte e basse pressioni (pressione-depressione) è detta effetto Bernoulli e porta alla generazione del moto ondoso.

Ogni ripple percorre uno spazio  $x$  in un intervallo di tempo  $t$ , con velocità  $c = x/t$ . Quando  $c \approx u$ , cessa il trasferimento di energia e si dice che il fenomeno è arrivato a saturazione: l'onda diviene indipendente dal tempo e dipenderà solo dall'intensità del vento.

L'onda dipende da vari fattori:

- Velocità del vento e sua intensità  $u$ ;
- Durata  $t$ . Se il vento è costante il moto ondoso può raggiungere il livello di saturazione, affinché questo avvenga è necessario che la durata del vento stesso sia sufficientemente lunga;
- Profondità  $d$ . Per ora abbiamo considerato una profondità del mare infinita, ma questa assunzione non è sempre realistica: in alcuni mari "bassi", come ad esempio il Mar Baltico, la bassa profondità impone un limite all'altezza massima di un'onda;

- Lunghezza del fetch, è la lunghezza della parte di mare interessata dal vento. Se il fetch è limitato per ragioni geografiche, come avviene nel Mediterraneo e nell'Adriatico, l'altezza delle onde risulta limitata e si parla di onde limitate per fetch.

## 1.2. Altezza e periodo di un'onda

Prima di definire l'altezza e il periodo di un'onda, è necessario definire precisamente che cosa sia un'onda. Per fare questo è opportuno fare una distinzione tra surface elevation e onda. Preso un intervallo di tempo di campionatura del moto ondoso la surface elevation è l'istantanea elevazione della superficie del mare relativa ad un determinato livello di riferimento (livello medio mare). Un'onda invece è il profilo della surface elevation tra due successive downward o upward zero-crossing dell'elevazione. L'analisi upward zero-crossing consiste nel cercare il punto dove il profilo della superficie incontra, salendo, la linea zero (livello medio mare) e tale punto viene assunto come inizio di un'onda singola. Successivamente si seguono gli alti e bassi del profilo irregolare della superficie fino a trovare il successivo punto di incontro, il quale discenderà fin sotto la linea zero, per risalire successivamente fino a quando troveremo il successivo punto di incontro con tale linea. Una volta trovato il successivo punto zero-crossing, questo definisce il termine della prima onda e l'inizio della seconda. Nel downward zero-crossing viene preso, come punto iniziale dell'onda, l'incontro del profilo dell'onda con il livello zero in fase di discesa. Il punto terminale dell'onda è dato dal successivo incontro con la linea zero, dopo che il profilo dopo alti e bassi è andato sopra il livello medio mare. La distanza tra due punti zero-crossing successivi definisce il periodo, se in ascissa è presente il tempo, altrimenti la lunghezza d'onda, se in ascissa considero la distanza orizzontale. Da quanto detto possiamo affermare che, mentre la surface elevation può essere sia positiva che negativa, un'onda può essere solamente positiva. La surface elevation, indicata con  $\eta(t)$ , è vista come un processo Gaussiano. Possiamo quindi utilizzare indifferentemente sia il downward che l'upward zero-crossing per definirla, in quanto la distribuzione statistica risulta essere simmetrica. Tuttavia, molti preferiscono usare la definizione del downward crossing in quanto si determina l'altezza d'onda con l'altezza della cresta relativa alla precedente depressione (Fig.6). In un'onda rotta le condizioni di simmetria perdono di significato e la differenza tra zero-up e zero-down crossing diventano rilevanti.

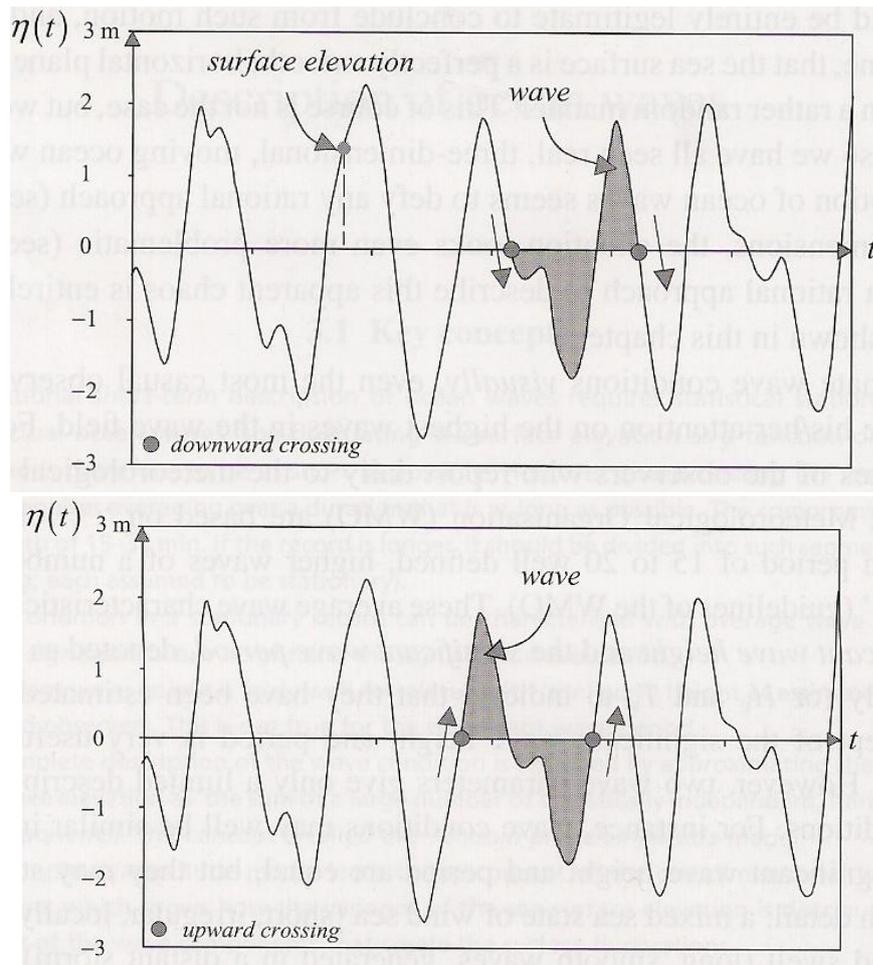


Fig. 6 - Downward e upward crossing

Preso un intervallo di tempo di campionamento abbastanza corto affinché il processo possa essere considerato stazionario e abbastanza lungo per definire accuratamente le caratteristiche di un'onda (15-30 min), definiamo l'altezza e il periodo di un'onda. L'altezza d'onda  $H$  è la distanza verticale tra il punto più alto e basso della surface elevation di un'onda (Fig.7). In un campionamento caratterizzato da  $N$  onde, l'altezza media  $\bar{H}$  è definita come:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$$

Dove con  $i$  si indica l'onda  $i$ -esima.

L'altezza significativa è definita come la media delle  $N/3$  onde più alte:

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j$$

Dove con  $j$  è stata indicata la sequenza delle  $N/3$  onde più alte. Questo può sembrare un modo strano di definire una altezza d'onda caratteristica, ma esperimenti hanno mostrato che il valore di questa altezza d'onda è molto simile al valore dell'onda stimata ad occhio. E' questo il motivo per cui c'è confusione sul fatto che sia l'altezza d'onda stimata ad

occhio che l'altezza d'onda caratteristica misurata sono chiamate "altezza d'onda significativa". Per distinguerle, l'altezza d'onda stimata ad occhio viene indicata con  $H_v$ , mentre l'altezza d'onda caratteristica misurata viene indicata con  $H_{1/3}$ . L'altezza significativa può essere anche stimata dall'analisi spettrale. Essa verrà indicata con  $H_{m0}$ .

Talvolta per caratterizzare un'onda si usa la media delle  $\frac{1}{10}$  onde più alte  $H_{\frac{1}{10}}$ :

$$H_{\frac{1}{10}} = \frac{1}{N/10} \sum_{j=1}^{N/10} H_j.$$

Se le onde non sono troppe ripide o di mare calmo, esistono delle relazioni tra le varie altezze d'onda caratteristiche.

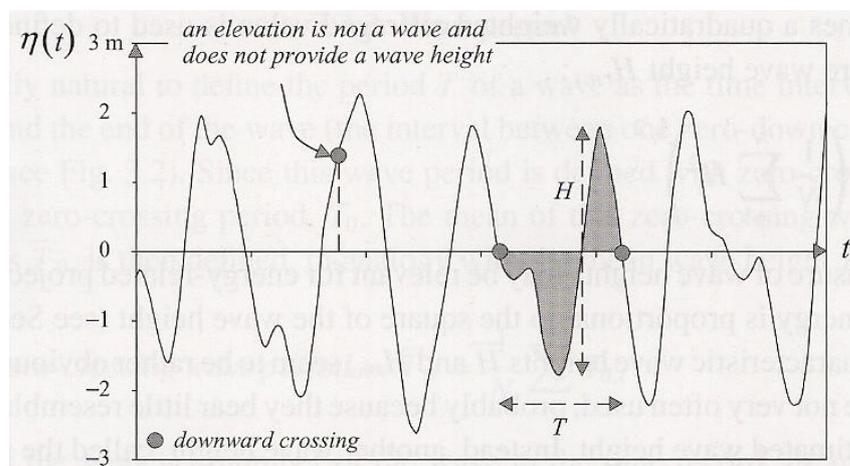


Fig. 7 - Altezza e periodo d'onda

Il periodo  $T$  di un'onda è l'intervallo di tempo tra l'inizio e la fine di un'onda (Fig.7). Se questo viene definito tramite lo zero-crossing è chiamato zero-crossing periodo  $T_0$ .

La media dello zero-crossing periodo, indicata con  $\bar{T}_0$ , è definita in analogia con l'altezza media di un'onda come:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{0i},$$

dove con  $i$  si indica l'onda  $i$ -esima.

In analogia con l'altezza d'onda significativa definisco il periodo d'onda significativo come:

$$T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_{0j},$$

dove con  $j$  viene indicata la sequenza delle  $1/3$  onde più alte.

Per distinguere, nella notazione, il periodo dell'onda significativa stimato ad occhio da quello misurato, facciamo riferimento rispettivamente a  $T_v$  ed a  $T_{\frac{1}{3}}$ .

Altre caratteristiche dell'onda verranno definite attraverso l'analisi spettrale [ 2 ].

### 1.3. Osservazioni visive e misure strumentali

Misurazioni d'onda (fatte con ondometri ecc) sono abitualmente effettuate solo in alcuni posti nel mondo: soprattutto lungo le coste dell'Europa, degli Stati Uniti, Canada e Giappone (sebbene le misurazioni satellitari stanno rapidamente surclassando queste in scala mondiale). In molti altri posti, gli ingegneri cercano di ricavare informazioni sulle onde tramite altre vie. Ci sono tre alternative: le osservazioni visive, misure da satellite e le simulazioni da computer. E' diventato perciò importante per gli ingegneri cercare di estendere le osservazioni visive a ciò che si ottiene dalle misurazioni strumentali. Per questo è stata ricavata, da studi fatti, una relazione tra altezza significativa osservata a vista  $H_v$  e altezza significativa misurata  $H_{\frac{1}{3}}$  (Fig.8):

$$H_{\frac{1}{3}} = 1.67 H_v^{0.77} \text{ (in metri),}$$

perciò  $H_{\frac{1}{3}}$  è circa uguale ad  $H_v$ .

A differenza di questo, il periodo significativo osservato non è uguale al periodo significativo misurato. La relazione che lega i due periodi è (Fig.8):

$$T_{\frac{1}{3}} = 2.83 T_v^{0.44} .$$

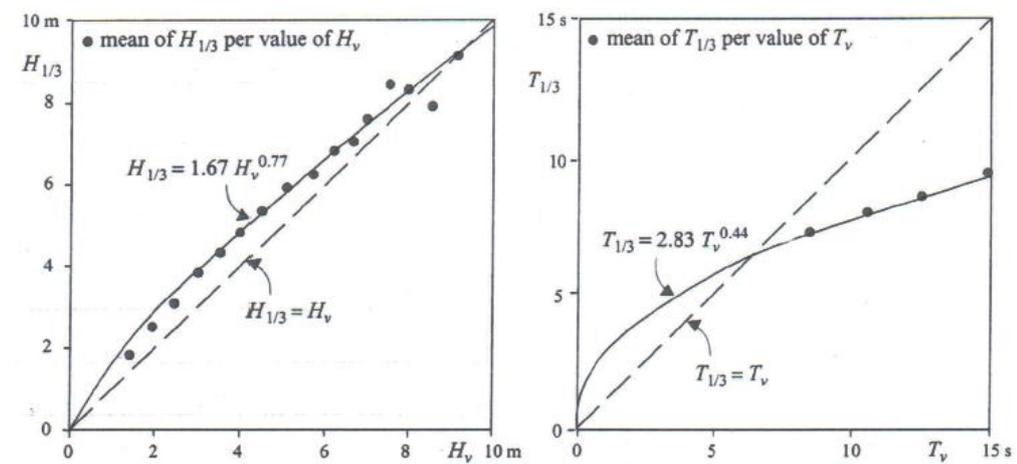


Fig. 8 - Relazione tra  $H_{\frac{1}{3}}$  e  $H_v$  e tra  $T_{\frac{1}{3}}$  e  $T_v$

## 2. Analisi spettrale

### 2.1. Lo spettro d'onda

Il concetto di altezza e periodo d'onda significativa è molto utilizzato in molte situazioni, ma fornisce una limitata descrizione delle caratteristiche di un'onda. Due tipi di stati d'onda, uno caratterizzato da onde corte e altamente irregolari e uno caratterizzato da onde lunghe e "regolari", possono avere più o meno la stessa altezza e periodo d'onda, ma la loro realtà è completamente diversa. Per fare una descrizione completa di un'onda è necessaria un'analisi spettrale. Questa è basata sul fatto che il movimento casuale della superficie del mare può essere visto come somma di un infinito numero di componenti di onde armoniche.

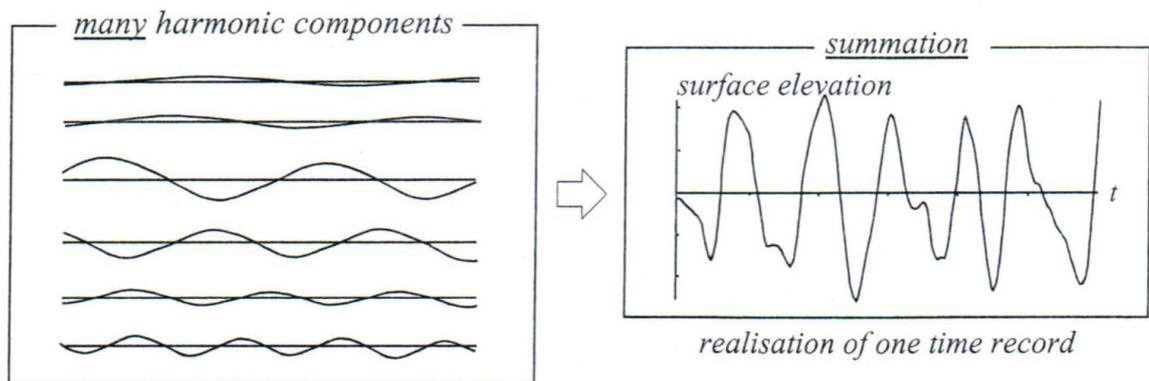


Fig. 9 - Superficie del mare schematizzata come somma di onde armoniche

La superficie del moto ondoso  $\eta(t)$ , funzione del tempo, di durata totale  $D$ , può essere riprodotta tramite la serie di Fourier come (Fig. 9):

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \quad (1)$$

dove  $a_i$  e  $\alpha_i$  rappresentano rispettivamente l'ampiezza e la fase di ogni frequenza  $f_i = i/D$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ; l'intervallo di frequenza  $\Delta f = 1/D$ , Fig.10). Con l'analisi di Fourier è possibile ricavarsi i valori della fase e dell'ampiezza per ogni frequenza  $f_i$  che, sostituite nell'equazione (1), riproducono la  $\eta(t)$ .

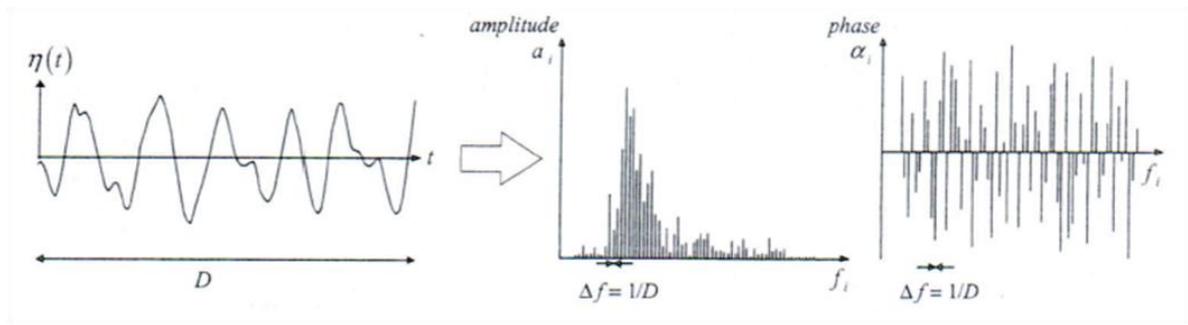


Fig. 10 -  $\eta(t)$ , ampiezza, fase

In acque profonde il valore delle fasi  $\alpha_i$  può assumere qualsiasi valore compreso tra 0 e  $2\pi$ :

$$p(\alpha_i) = \frac{1}{2\pi} \quad \text{con } 0 < \alpha_i < 2\pi.$$

Per caratterizzare la  $\eta(t)$  è stato fatto riferimento allo spettro dell'ampiezza (amplitude spectrum). Per un elevato numero di registrazioni ondamiche di una stessa mareggiata le ampiezze delle componenti armoniche, ad una data frequenza, sono caratterizzate dalla distribuzione di Rayleigh. Presa una certa frequenza, facendo la media delle ampiezze su M mareggiate, è possibile definire:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \alpha_{im} \quad \text{per ogni frequenza } f_i, \text{ avendo indicato con } \alpha_{im} \text{ il valore di } \alpha_i \text{ nell'esperimento di sequenza } m \text{ e frequenza } f_i.$$

Per ricavare la formula che esprime l'energia del moto ondoso è conveniente fare riferimento alla varianza dell'amplitude spectrum  $\frac{1}{2} \bar{\alpha}_i^2$ . Essendo la varianza dell'amplitude spectrum discreta (solo le frequenze  $f_i$  sono presenti), viene divisa per l'intervallo di frequenza  $\Delta f = 1/D$  e si ottiene la densità di varianza spettrale definita per ogni frequenza ( $\frac{1}{2} \bar{\alpha}_i^2 / \Delta f$ ). Per eliminare la discontinuità del "saltare" da una frequenza all'altra viene fatto tendere a zero l'intervallo di frequenza  $\Delta f$  e si definisce  $E(f)$  come:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{2} \bar{\alpha}_i^2 / \Delta f \quad \text{oppure} \quad E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} E \left\{ \frac{1}{2} \underline{\alpha^2} \right\} / \Delta f$$

La sottolineatura dell'ampiezza indica che viene considerata quest'ultima come una variabile casuale e con  $E \left\{ \frac{1}{2} \underline{\alpha^2} \right\}$  il valore atteso. Essendo una variabile casuale è caratterizzata dalla sua funzione di densità di probabilità (di Rayleigh)

$$P(\alpha_i) = \frac{\pi}{2} \frac{\alpha_i}{\mu_i} \exp\left(-\frac{\pi \alpha_i^2}{4\mu_i}\right) \quad \text{con } \alpha_i > 0$$

Avendo indicato con  $\mu_i$  il valore atteso della variabile casuale  $a_i$ . Per ogni frequenza, dalle rispettive funzioni di densità di probabilità, è stato possibile ricavarsi il valore atteso delle variabili casuali  $\underline{a}_i$  ed è stato trovato l'amplitude spectrum (Fig.11-12). Dall'amplitude spectrum è possibile ricavarsi la variance spectrum (Fig. 13), da questa la variance density spectrum (Fig.14-15).

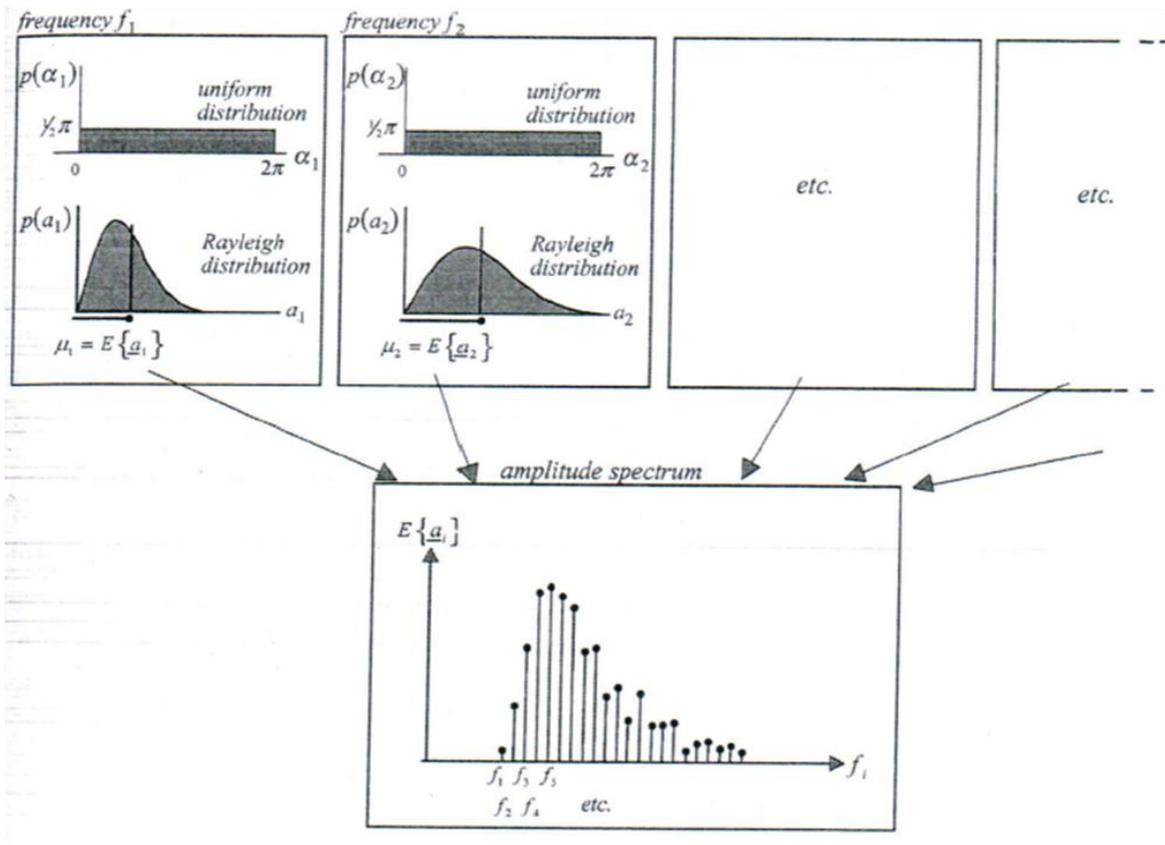


Fig. 11 - Amplitude spectrum

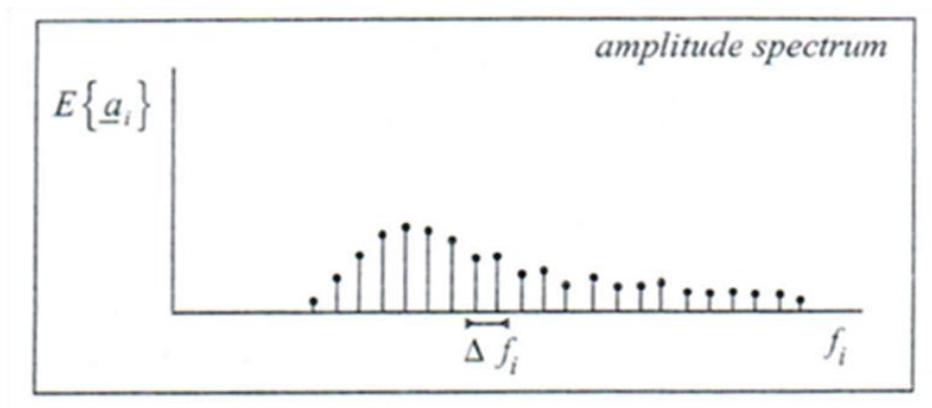


Fig. 12 - Amplitude spectrum

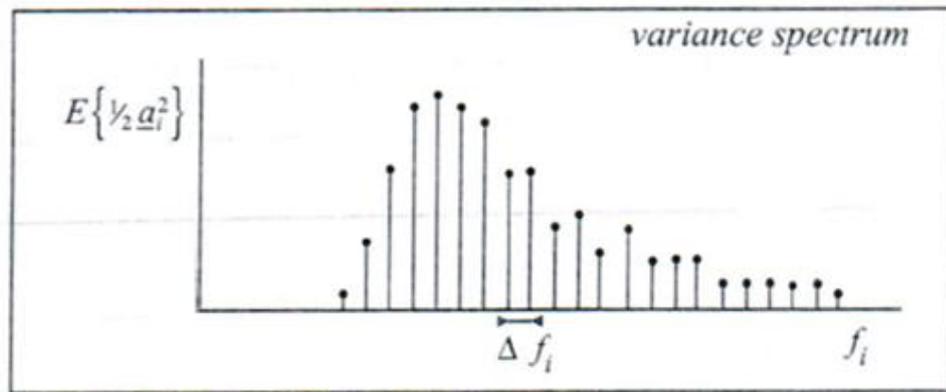


Fig. 13 - Variance spectrum

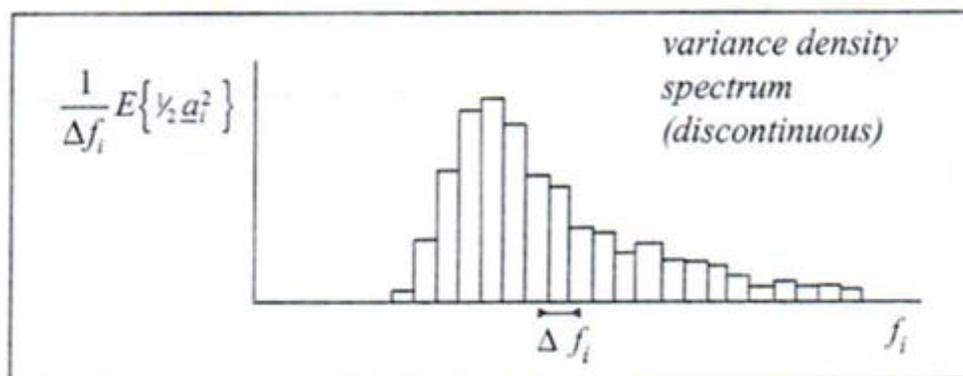


Fig. 14 - Variance density spectrum (discontinuous)

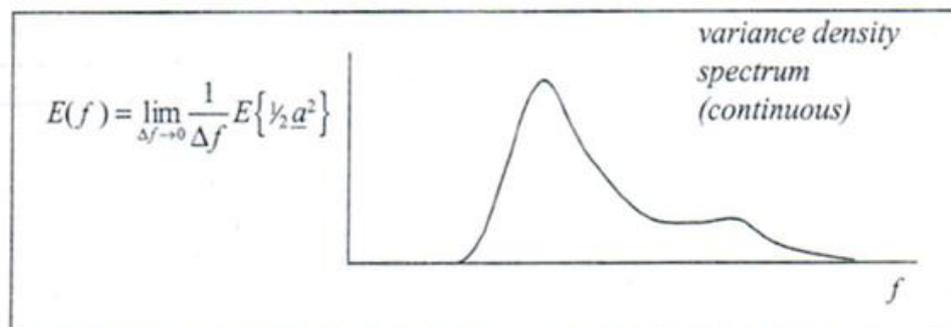


Fig. 15 - Variance density spectrum

La variance density spectrum è stata introdotta per trasformare l'amplitude spectrum (discreto) in una distribuzione continua della varianza sulle frequenze. Questo spettro mostra quanto  $E(f)$  della banda di frequenza  $\Delta f$  contribuisce alla varianza totale (Fig.16):

$$\Delta var = \int_{\Delta f} E(f) df$$

Segue che la varianza totale  $\overline{\eta^2}$  dell'elevazione della superficie del mare è data dalla somma delle varianze di tutte le bande di frequenza, o per uno spettro continuo:

$$\text{total variance} = \overline{\eta^2} = \int_0^{\infty} E(f)df = m_0$$

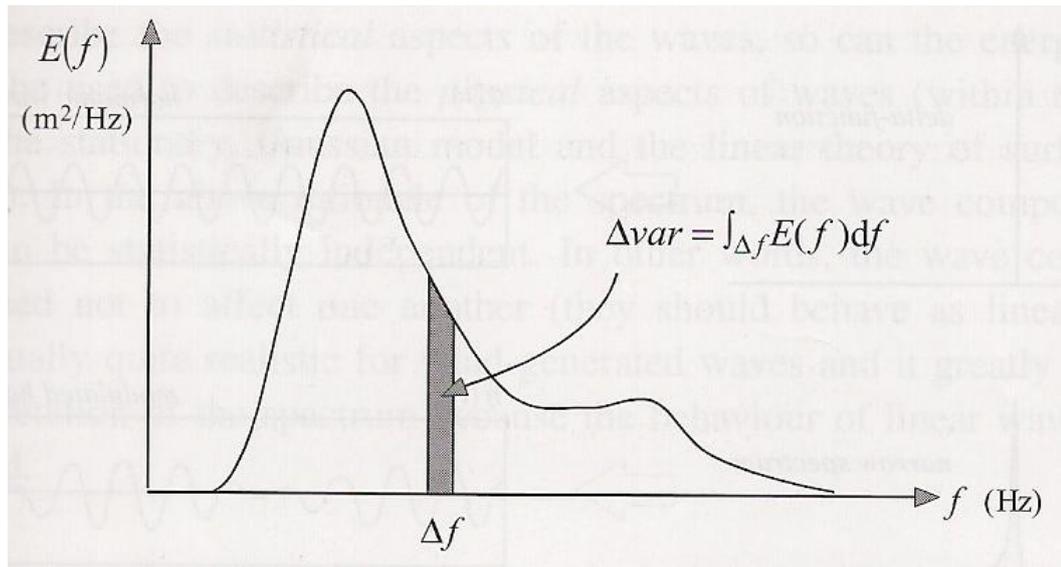


Fig. 16 -  $\Delta var$  della banda di frequenza  $\Delta f$

Si nota che in un campo d'onda, il contributo di una singola frequenza rispetto alla total variance è infinitamente piccolo perché la larghezza di banda di una singola frequenza è zero:  $\Delta f \rightarrow 0$  e il suo contributo  $\Delta var = E(f)\Delta f \rightarrow 0$ . Tuttavia, lo spettro di un'onda armonica (un'onda con una sola frequenza) contiene un'energia finita. Il suo spettro perciò consiste in un delta-function a quella particolare frequenza (infinitamente stretto e alto).

La variance density spectrum  $E(f)$ , che mostra quanto la varianza dell'elevazione superficiale è distribuita sulle frequenze, risulta di difficile interpretazione. Ci può essere di aiuto moltiplicare lo spettro per  $\rho g$ , otteniamo così l'energy density spectrum. Questo spettro mostra come l'energia dell'onda (wave Energy) è distribuita sulle frequenze e questo sembra essere di più facile comprensione. L'aspetto delle onde può essere dedotto dalla forma dello spettro, questo viene mostrato nelle figure seguenti che fanno riferimento a tre differenti condizioni d'onda (Fig.17). Nella prima figura troviamo lo spettro infinitamente stretto che corrisponde ad un'onda armonica, questo è una delta function caratterizzato da un'unica frequenza. Nella seconda figura si fa riferimento ad una modulating harmonic wave che avendo una banda di frequenza leggermente più larga ci fornisce uno spettro più largo della delta-function. Nella terza figura si fa riferimento ad un'onda irregolare, caratterizzata da banda di frequenza più larga e da uno spettro a sua volta più largo.

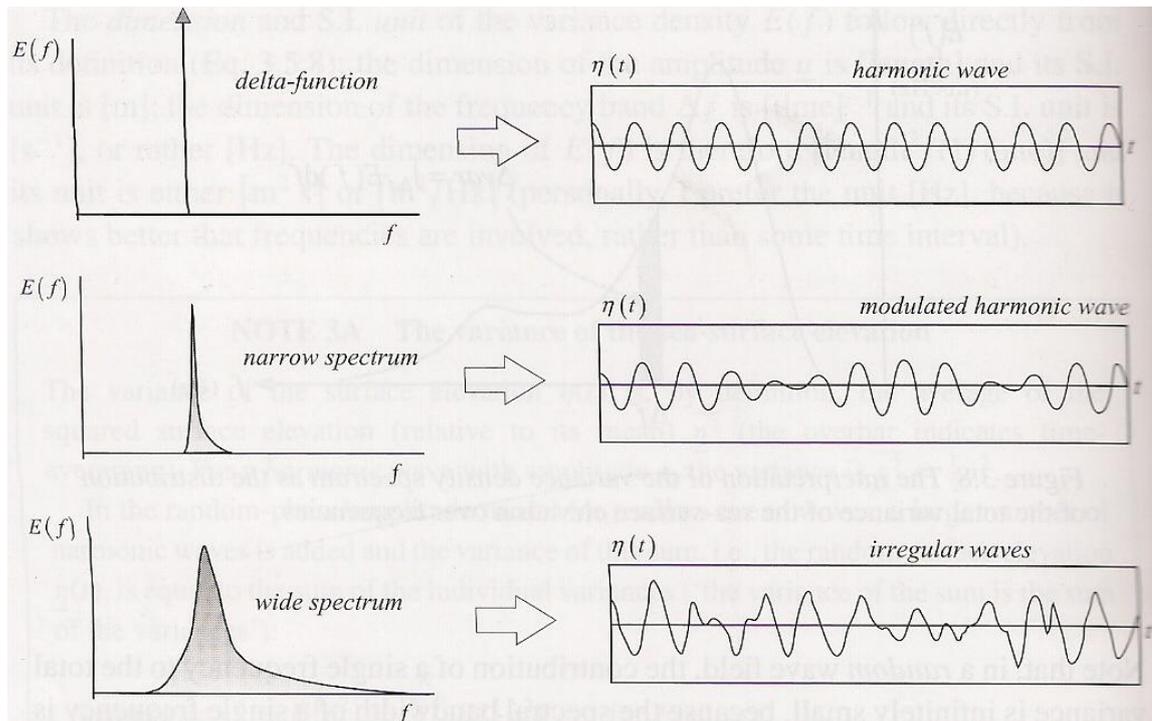


Fig. 17 - Delta-function, narrow spectrum, wide spectrum

L'energia totale associata al moto ondoso diventa:

$$E_{totale} = \rho g \overline{\eta^2}$$

Possiamo tuttavia moltiplicare la variance density spectrum  $E_{variance}(f) = E(f)$  per  $\rho g$  ed ottenere l'energy density spectrum come:

$$E_{energy} = \rho g E_{variance}(f)$$

Questa relazione porta ad un uso ambiguo della parola 'spectrum'. Essa si riferisce sia alla variance density spectrum sia alla Energy density spectrum. Molto spesso si usa il termine 'spectrum' in un determinato contesto che toglie le possibili incomprensioni. La variance density spectrum è usata per descrivere gli aspetti statistici delle onde, mentre l'energy density spectrum è usato per descrivere gli aspetti fisici delle onde:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \text{ altezza significativa in acque alte.}$$

La variance density è stata definita in termini di frequenza  $f = \frac{1}{T}$  (dove T è il periodo dell'onda armonica) ma può essere ugualmente ben definita in termini di frequenza radiale  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . Il corrispondente spettro  $E(\omega)$  è definito nella solita maniera di  $E(f)$ ; la sola differenza sta nel fatto che  $\cos(2\pi ft + \alpha)$  viene sostituito da  $\cos(\omega t + \alpha)$ . Questi spettri sono

ovviamente correlati:  $E(\omega)$  può essere espresso in termini di  $E(f)$  e viceversa, ma il total variance  $\overline{\eta^2}$  rimane uguale:

$$\overline{\eta^2} = \int_0^\infty E(f) df = \int_0^\infty E(\omega) d\omega$$

Per cui:

$$E(f) df = E(\omega) d\omega$$

Oppure:

$$E(\omega) = \frac{E(f) df}{d\omega} = E(f) J,$$

$J = \frac{df}{d\omega}$  viene chiamato lo Jacobiano. In questo caso, nella trasformazione di  $E(f)$  in  $E(\omega)$ ,  $J$  ha il valore di  $\frac{1}{2\pi}$ .

## 2.2. Modelli spettrali

La maggior parte dei modelli spettrali prende la forma  $E(\omega) = B(\omega)^{-p} \exp(-C\omega^{-q})$ , in cui  $B$ ,  $C$ ,  $p$  e  $q$  sono parametri che determinano la forma dello spettro. Molti spettri del moto ondoso utilizzati correntemente si possono descrivere in termini di due soli parametri indipendenti, legati all'altezza dell'onda e alla sua frequenza, e di una costante adimensionale che varia in funzione della frequenza dell'onda. La forma generale di questo modello a due parametri è:

$$E(\omega) = \frac{A}{4} H_s^2 \frac{\bar{\omega}^4}{\omega^5} \exp\left[-A \left(\frac{\omega}{\bar{\omega}}\right)^{-4}\right]$$

In cui  $A$  è la costante adimensionale,  $H_s$  è l'altezza significativa dell'onda e  $\bar{\omega}$  la frequenza caratteristica dello spettro. Dai momenti spettrali possiamo ricavarci il periodo significativo dell'onda  $T_s = 2\pi m_0/m_1$  e il periodo dell'attraversamento dello zero verso l'alto  $T_z = 2\pi (m_0/m_2)^{1/2}$ .

Modelli di mari completamente formati sono stati sviluppati da Pierson e Moskowitz (P-M), da Bretschneider, dall'ISSC (International Ship and offshore Structures Congress) e dall'ITTC (International Towing Tank Conference). Questi autori hanno ricavato risultati

simili tra loro e i rispettivi valori per il modello a due parametri, riportati in Fig.18, in cui sono inclusi i seguenti parametri:  $A$ , coefficiente adimensionale;  $\bar{\omega}$ , frequenza media;  $\omega_z$ , frequenza di attraversamento della quota zero;  $\omega_0$ , la frequenza di picco;  $\omega_s$ , la frequenza significativa.

MODELLO	$A$	$\omega_z$	$\omega_z/\omega_0$	$\omega_z/\bar{\omega}$	$\omega_z/\omega_s$
Pierson-Moskowitz (P-M)	1,25	$\omega_0$	1,0	0,772	0,710
Bretschneider	0,675	$\omega_s$	1,167	0,90	0,829
ISSC	0,4427	$\bar{\omega}$	1,296	1,0	0,921
ITTC	1,25	$\omega_0$	1,0	0,772	0,710

Fig. 18 - Valori delle costanti che compaiono nel modello a due parametri

Per tenere conto di modificazioni della forma spettrale in mari non completamente formati, è stato sviluppato lo spettro JONSWAP da Hasselmann, nell'ambito del Joint North Sea Wave Project. La formulazione (P-M) viene modificata come segue:

$$E(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[ -1.25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right]}.$$

Il parametro di curtosi (appuntimento)  $\gamma$  può variare tra 1 e 7, ma tipicamente vale 3,3, regola il grado di concentrazione dell'energia intorno alla frequenza di picco. In particolare elevati valori di  $\gamma$  ( $\gamma > 3.3$ ) rappresentano spettri molto "stretti", per i quali la maggior parte dell'energia del moto ondoso ha frequenze prossime alle frequenze dominanti; al contrario piccoli valori ( $\gamma < 3.3$ ) rappresentano stati di mare con elevata variabilità della frequenza delle onde. Per il fattore di forma  $\tau$  si assume il valore 0.07 per  $\omega \leq 5.24/T_z$  e 0.09 per  $\omega > 5.24/T_z$ . Il parametro  $\alpha$  vale  $0.076 X_0^{-0.22}$ , dove  $X_0$  è il fetch adimensionale, definito come  $X_0 = gX/U_w^2$ ,  $X$  è il fetch in metri e  $U_w$  è la velocità prevalente del vento durante la formazione delle onde.

## 2.3. La trasformata di Fourier

Lo spettro è stato definito precedentemente come:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} E \left\{ \frac{1}{2} \alpha^2 \right\} / \Delta f$$

Dove con  $\underline{a}$  è stato indicata l'ampiezza dell'onda armonica e con  $\Delta f$  una banda di frequenza scelta arbitrariamente. L'analisi spettrale è essenzialmente l'elaborazione di questa definizione. E' necessario stimare l'ampiezza  $\underline{a}$ , determinare il valore atteso  $E\left\{\frac{1}{2}\underline{a}^2\right\}$ , dividere il valore atteso per l'intervallo di frequenza  $\Delta f$  e in seguito fare il limite a  $\Delta f \rightarrow 0$ . Tuttavia le stime differiscono da queste definizioni, la stima dell'ampiezza per ogni frequenza necessita che l'elevazione superficiale del mare possa essere scritta come una serie di Fourier con ampiezze e fasi non conosciute:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \text{ con } f_i = i/D \text{ e } \cosi \Delta f = 1/D .$$

Questa definizione è una versione non-random del random-phase/amplitude model, in quanto per una data wave record, le fasi e le ampiezze vengono ricavate direttamente dal record. Usando le identità trigonometriche, l'equazione può essere scritta come:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N [A_i \cos(2\pi f_i t) + B_i \sen(2\pi f_i t)]$$

Con ampiezza  $a_i$  e fase  $\alpha_i$ :

$$a_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$$

$$\text{e } \tan \alpha_i = - \frac{B_i}{A_i}$$

Le ampiezze  $A_i$  e  $B_i$  possono essere determinate dalla wave record tramite gli integrali di Fourier:

$$A_i = \frac{2}{D} \int_D \eta(t) \cos(2\pi f_i t) dt$$

$$B_i = \frac{2}{D} \int_D \eta(t) \sen(2\pi f_i t) dt$$

L'operazione sulla wave record per ottenere le ampiezze  $a_i$  è chiamata "la trasformata di Fourier" ( $A_i$  e  $B_i$  vengono chiamati i coefficienti di Fourier). Applicando questa operazione a tutte le frequenze  $f_i$ , tutti i valori di  $A_i$  e  $B_i$  vengono ricavati e successivamente anche tutti i valori di  $a_i$  e  $\alpha_i$ . A questo punto il prossimo passo è di stimare il valore atteso  $E\left\{\frac{1}{2}\underline{a}^2\right\}$ , dividere questo per l'intervallo di frequenza  $\Delta f$  e

successivamente fare il  $\Delta f \rightarrow 0$ . Tuttavia, a parte la divisione per  $\Delta f = 1/D$ , svolgere gli altri passaggi sarà impossibile a causa di problemi pratici:

1. La durata della wave record è limitata
2. Solitamente c'è solo una wave record
3. La wave record è discretizzata nel tempo

1. Nella trasformata di Fourier di una wave record, l'intervallo di frequenza  $\Delta f$  ha un valore costante determinato dalla durata  $D$  del record:  $\Delta f = 1/D$ . Prendendo il limite di  $\Delta f \rightarrow 0$  (come detto precedentemente) implica che  $D$  tenda all'infinito e questo è in contrasto con la durata finita di una wave record. La stima dello spettro, per necessità, diventa a questo punto:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} E \left\{ \frac{1}{2} \underline{a^2}_i \right\} \approx \frac{1}{\Delta f} E \left\{ \frac{1}{2} \underline{a^2}_i \right\} \quad \text{con } \Delta f = \frac{1}{D}$$

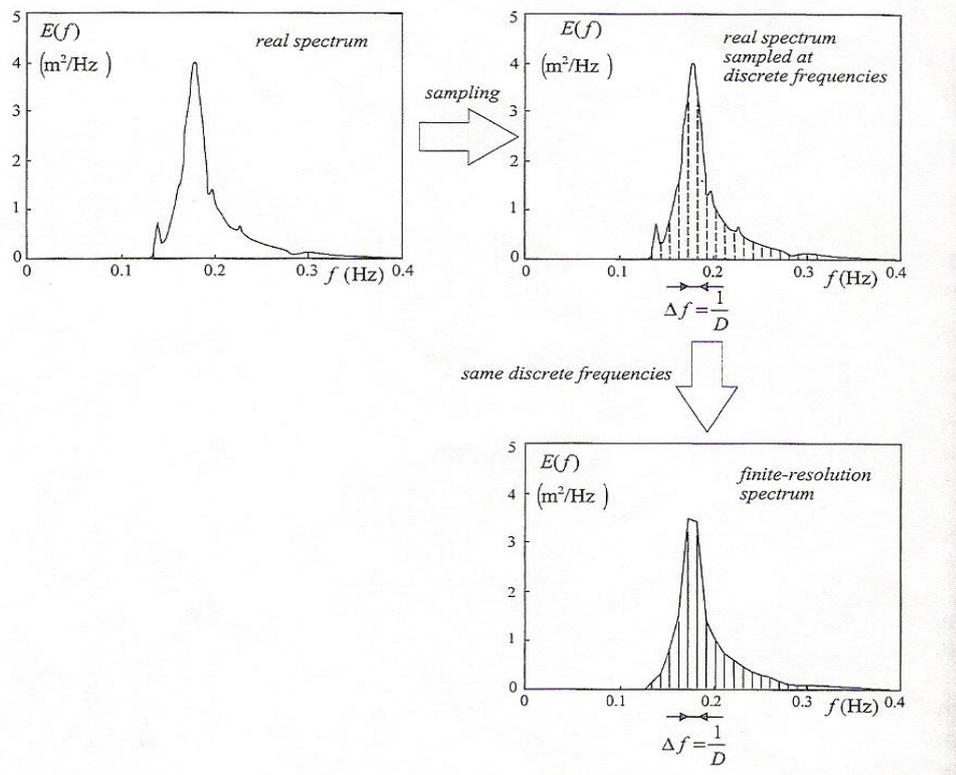


Fig. 19 - La risoluzione di frequenza  $\Delta f = 1/D$  rimuove dettagli dallo spettro

L'intervallo di frequenza  $\Delta f = 1/D$  implica che i dettagli dello spettro che stanno all'interno di questo intervallo non vengono presi in considerazione (Fig.19). In altre parole i dettagli su scala di frequenza  $\Delta f = 1/D$ , vengono persi. La durata  $D$  dovrebbe essere scelta abbastanza lunga affinché i dettagli che sono necessari possano essere visti. L'intervallo di frequenza  $\Delta f = 1/D$  viene chiamato frequenza di risoluzione. La frequenza

di risoluzione può essere migliorata soltanto prendendo una durata di campionamento più lunga. Tuttavia la scelta della durata  $D$  è un compromesso, deve essere sufficientemente corta affinché il processo possa essere considerato stazionario e sufficientemente lunga affinché la frequenza di risoluzione possa essere ad un livello di accuratezza adeguato. In più deve essere sufficientemente lunga affinché si possano ottenere stime statistiche affidabili.

2. Usualmente solo una wave record è disponibile per l'analisi spettrale e questo significa che la densità di varianza debba essere stimata da una sola ampiezza, da  $\frac{1}{2}a_i^2$ , piuttosto che da  $E\left\{\frac{1}{2}a_i^2\right\}$ . Questo ci fornisce una stima "grezza" di  $E(f)$  (Fig.20):

$$E(f) \approx \frac{1}{\Delta f} E\left\{\frac{1}{2}a_i^2\right\} \rightarrow \frac{1}{\Delta f} \left(\frac{1}{2}a_i^2\right) \quad \text{con frequency resolution } \Delta f = \frac{1}{D}.$$

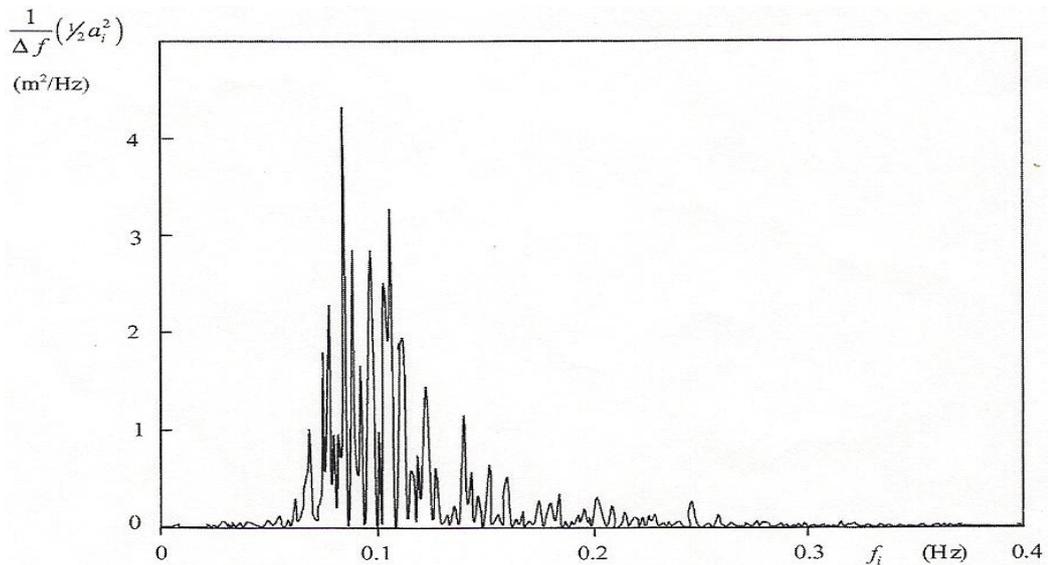


Fig. 20 - Lo spettro "grezzo" appare "appuntito" perché la variance density è stimata da una sola ampiezza per frequenza

Questa stima "grezza" può essere ritenuta accettabile se la differenza tra  $E\left\{\frac{1}{2}a_i^2\right\}$  e  $\frac{1}{2}a_i^2$  è relativamente piccola. Questa però è dell'ordine del 100%, questo grande errore è dovuto alle innumerevoli "punte" dello spettro grezzo (Fig. 19). Per risolvere il problema viene diviso il tempo  $D$  per un numero  $p$  di segmenti non sovrapposti, ognuno con durata  $D^* = D/p$ . Ognuno di questi segmenti viene poi analizzato tramite Fourier per ottenere valori di  $\frac{1}{2}a_i^2$  con risoluzione  $\delta f$  determinata dalla durata dei segmenti:  $\delta f = 1/D^* = 1/(D/p) = p \Delta f$ .

Il valore atteso  $E\left\{\frac{1}{2}a_i^2\right\}$  è stimato come media di questi valori (per ogni frequenza separatamente, questa viene chiamata quasi-ensemble average, indicata con  $\langle \cdot \rangle$ ) (Fig.21):

$$E\left\{\frac{1}{2}a_i^2\right\} \approx \left\langle \frac{1}{2}a_i^2 \right\rangle$$

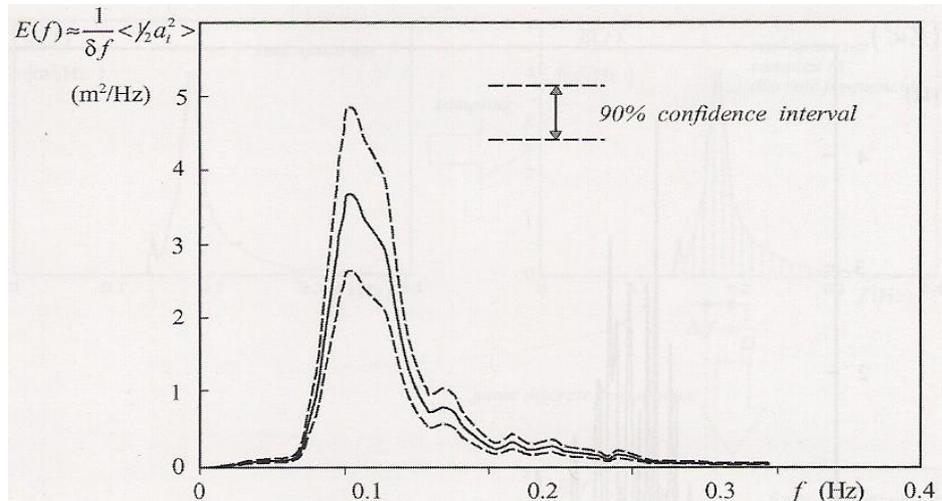


Fig. 21 - Lo spettro quasi-ensemble averaged

Lo spettro quasi-ensemble average ha un errore ridotto del fattore  $\sqrt{p}$ :

$$E(f) \approx \frac{1}{\delta f} \left\langle \frac{1}{2} a_i^2 \right\rangle \quad \text{con risoluzione } \delta f = p \Delta f \quad \text{ed errore} \approx \frac{100\%}{\sqrt{p}}.$$

Ovviamente, questa migliore affidabilità porta ad una riduzione di un fattore  $p$  della risoluzione spettrale. Un compromesso per bilanciare un'accettabile affidabilità e un'accettabile risoluzione di frequenza è che la durata sia di  $D=15-30$  min e il valore di  $p=20-30$ . La corrispondente risoluzione di frequenza diventa  $\delta f \approx 0.01-0.02$  Hz e l'errore di circa il 20%.

3. La wave record è discreta nel tempo perché il segnale originale del sensore d'onda è campionato ad un intervallo fisso di tempo  $\Delta t$ . Questo comporta il problema dell'aliasing come mostrato in Fig.22.

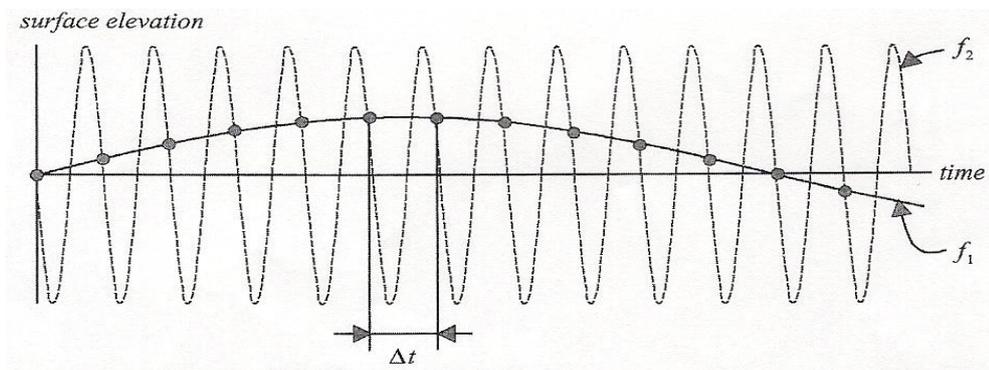


Fig. 22 – Intervalli fenomeno dell'aliasing

La conseguenza è che, le onde ad alta frequenza vengono erroneamente misurate come onde a bassa frequenza. Il valore della frequenza oltre la quale avviene il fenomeno è detta “la frequenza di Nyquist”:

$$f_{Nyquist} = f_N = \frac{1}{2\Delta t}$$

## 2.4. Spettro in frequenza direzionale

La variance density spectrum (monodimensionale) caratterizza la stazionaria, Gaussian surface elevation come funzione del tempo (riferito a una determinata posizione geografica). Per descrivere l'effettivo, a tre dimensioni, movimento d'onda, si deve aggiungere la dimensione orizzontale. Per fare ciò espandiamo il random-phase/amplitude model considerando un'onda armonica che si propaga nello spazio x,y, in direzione  $\theta$  relativa all'asse x positivo:

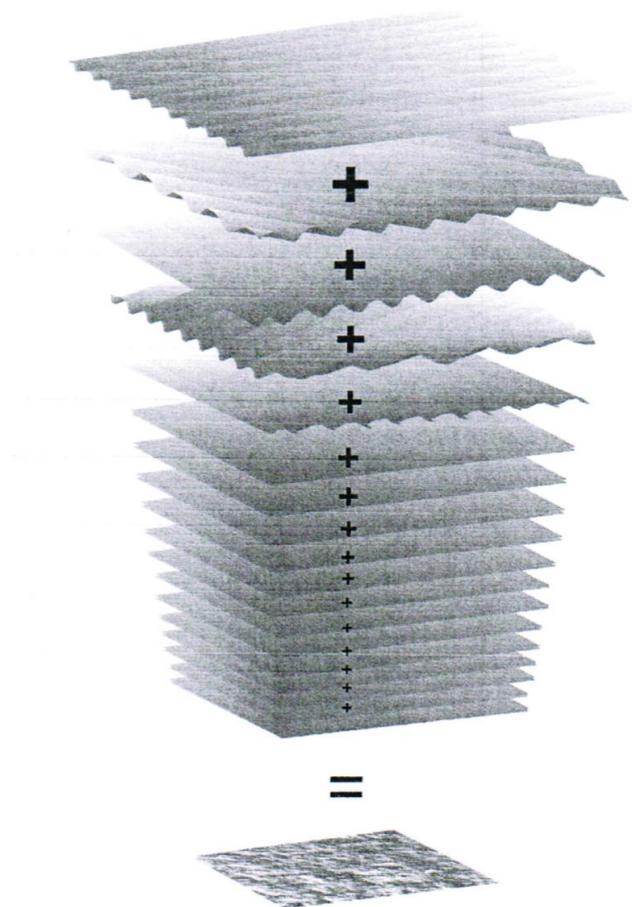


Fig. 23 - La superficie del mare vista come somma di un gran numero di componenti di onde armoniche

$$\eta(x,y,t) = a \cos(\omega t - k_x x - k_y y + \alpha)$$

oppure

$$\eta(x,y,t) = a \cos(\omega t - k_x x - k_y y + \alpha)$$

dove il numero d'onda  $k = 2\pi/L$ ,  $k_x = k \cos \theta$ ,  $k_y = k \sin \theta$  e  $\theta$  è la direzione di propagazione di un'onda. Analogamente al modello monodimensionale, il corrispondente random-phase/amplitude model (tridimensionale) è dato dalla somma di un gran numero di onde armoniche che si propagano:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \underline{a}_{i,j} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i y \sin \theta_j + \underline{\alpha}_{i,j}) .$$

Aggiungendo due dimensioni all'originale monodimensionale random-phase/amplitude model (le dimensioni  $x$  e  $y$ , aggiunte al tempo  $t$ , oppure, equivalentemente, il numero d'onda  $k$  e la direzione  $\theta$ , aggiunte alla frequenza  $\omega$ ) risultano esserci due indici in più nella sommatoria dell'equazione precedente. Tuttavia l'indice per il numero d'onda  $k$  è uguale all'indice per la frequenza  $\omega$  perché la frequenza e il numero d'onda sono correlati dalla relazione di dispersione  $\omega^2 = g \tan h(kd)$ , dove con  $d$  è stata indicata la profondità d'acqua. Ogni numero d'onda  $k$  perciò corrisponde ad una frequenza  $\omega$  e viceversa. L'apparente random-phase/amplitude model (tridimensionale) quindi si riduce ad un modello bidimensionale in termini di frequenza (o numero d'onda) e direzione. Ogni componente d'onda è così indicata nell'equazione precedente con solo due indici:  $i$  per la frequenza o il numero d'onda e  $j$  per la direzione. Come nel modello monodimensionale, ogni componente d'onda individuale nel modello bidimensionale ha un'ampiezza casuale  $\underline{a}_{i,j}$  (distribuita secondo Rayleigh) e una fase casuale  $\underline{\alpha}_{i,j}$  (distribuita uniformemente). In più, analogamente alla definizione dello spettro monodimensionale, gli esatti valori delle frequenze  $\omega_i$  e delle direzioni  $\theta_j$  sono meno importanti quanto più il loro intervallo è più piccolo, le frequenze si trovano nel range delle onde generate da vento e le direzioni vanno da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . Questo random-phase/amplitude model bidimensionale rappresenta un processo Gaussiano che è stazionario nel tempo e omogeneo nello spazio  $x,y$ : un moto ondoso irregolare visto come somma di molte componenti di onda armoniche che si propagano con varie ampiezze, fasi e frequenze (o lunghezze d'onda) in varie direzioni attraverso la superficie dell'oceano. L'effetto è una realistica rappresentazione di onde random e short-crested.

Usando le solite tecniche di prima l'ampiezza spectrum discreto bidimensionale può essere trasformato in un variance density spectrum continuo bidimensionale (Fig.24) così che, per tutti gli  $i$  e gli  $j$

$$E(\omega, \theta) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\omega \Delta\theta} E\left\{\frac{1}{2} \underline{a}^2\right\}$$

Oppure in termini di frequenza  $f$ ,

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f \Delta\theta} E\left\{\frac{1}{2} \underline{a}^2\right\}$$

Usando lo Jacobiano,

$$E(\omega, \theta) = \frac{1}{2\pi} E(f, \theta)$$

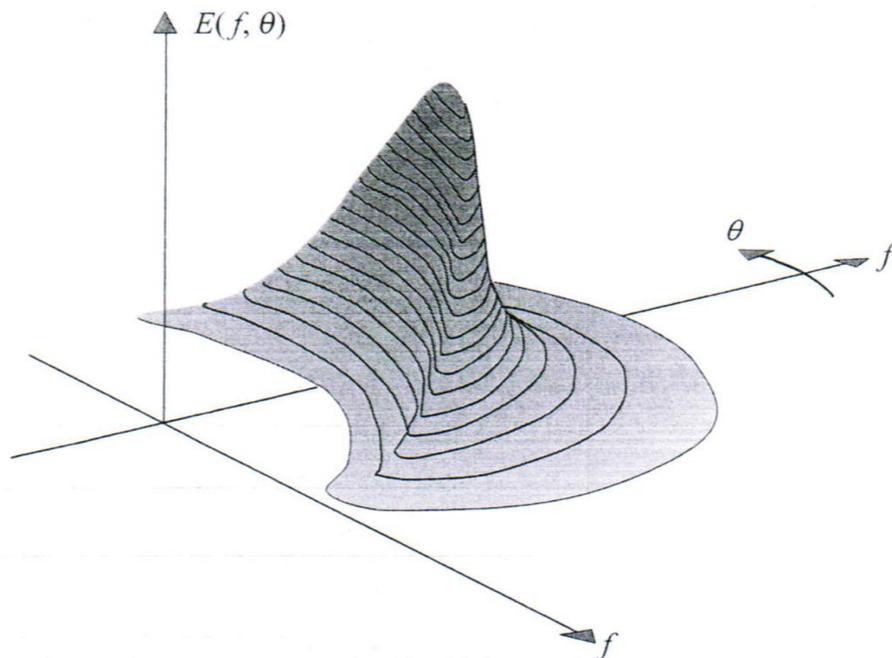


Fig. 24 - Spettro bidimensionale

La dimensione dell'ampiezza  $\underline{a}$  è [lunghezza] e la sua unità ( S.I ) è il [m]. La dimensione della banda di frequenza  $\Delta f$  è [tempo]<sup>-1</sup> e la sua unità S.I è [s<sup>-1</sup>] o [Hz]. La banda di direzione  $\Delta\theta$  è adimensionale ma la sua unità S.I è il grado o radiante. La dimensione di  $E(f, \theta)$  è a questo punto [lunghezza<sup>2</sup> / (1/tempo)] e la sua unità S.I è [m<sup>2</sup>/Hz/grad]. Lo spettro bidimensionale  $E(f, \theta)$  mostra come la varianza di  $\eta(x, y, t)$  è distribuita sulle frequenze e le direzioni come nel caso dello spettro di frequenza monodimensionale mostra

come la varianza è distribuita sulle frequenze. Il volume di  $E(f,\theta)$  è a questo punto uguale alla total variance  $\overline{\eta^2}$  dell'elevazione della superficie del mare:

$$\overline{\eta^2} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} E(f, \theta) df d\theta$$

Il contributo delle bande spettrali  $(\Delta f, \Delta\theta)$  alla total variance è (Fig.25) :

$$\Delta var = \int_{\Delta f} \int_{\Delta\theta} E(f, \theta) df d\theta$$

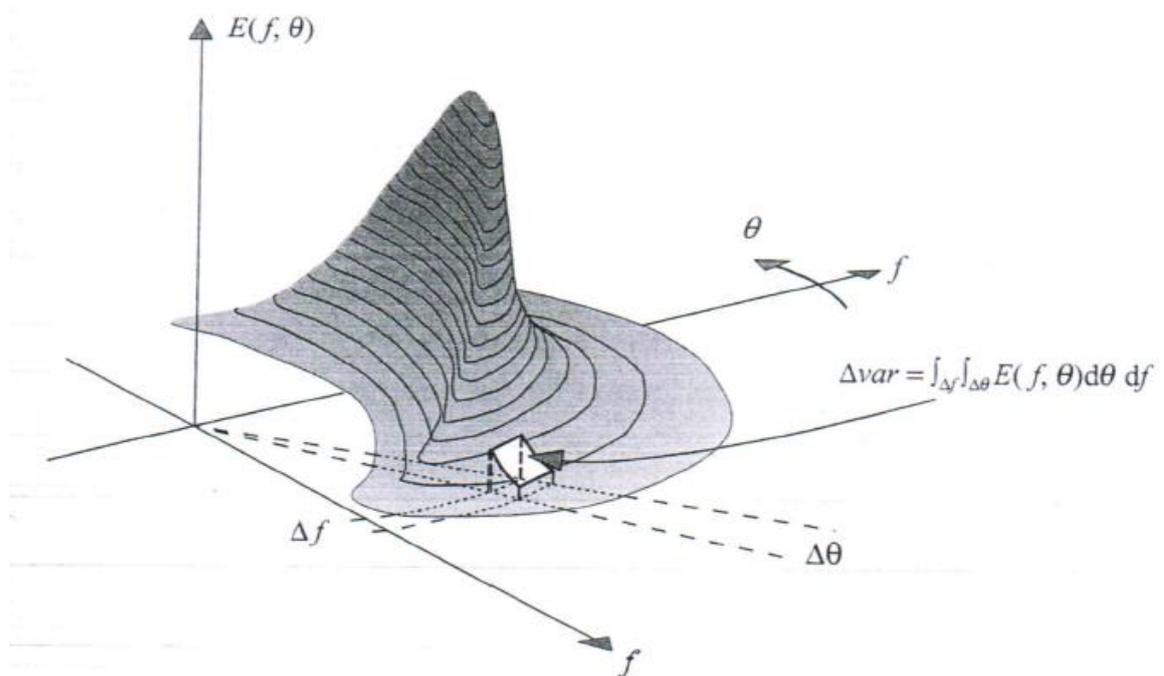


Fig. 25 - Il contributo  $\Delta var$  in uno spettro bidimensionale  $(\Delta f, \Delta\theta)$  rispetto alla total variance

Lo spettro  $E(f)$ , che non contiene la direzione, può essere ricavato dallo spettro di frequenza-direzione  $E(f,\theta)$  rimuovendo tutte le informazioni riguardanti la direzione integrando su tutte le direzioni (per ogni frequenza):

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad [1].$$

### 3. Energia e potenza del moto ondoso

#### 3.1. Energia e potenza del moto ondoso

In assenza di fenomeni dissipativi, l'energia associata al moto ondoso è costituita solo da energia potenziale e cinetica. Trattandosi di un moto oscillatorio essa risulta in un punto ( $x$ ;  $y$ ) funzione del tempo. Tuttavia per coglierne sinteticamente il contenuto medio si è solito far riferimento all'*energia specifica* definita come energia media (nel tempo) per unità di superficie. L'energia specifica viene anche denominata *densità di energia*.

L'energia di un'onda è data dalla somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale. L'energia potenziale è data dal lavoro fatto contro la gravitazione per spostare le particelle d'acqua dalla loro posizione di riposo, l'energia cinetica è dovuta al movimento delle particelle nel moto ondoso. Viene determinata l'energia potenziale media per unità di superficie associata alla presenza di onda come la differenza tra l'energia potenziale in presenza o meno dell'onda. L'energia potenziale di una piccola colonna di acqua di massa  $dm$  relativa al fondo è:

$$d(PE) = dm g \bar{z}$$

dove con  $\bar{z}$  è l'altezza del centro di gravità di massa e può essere scritta come (Fig.26):

$$\bar{z} = \frac{h+\eta}{2}$$

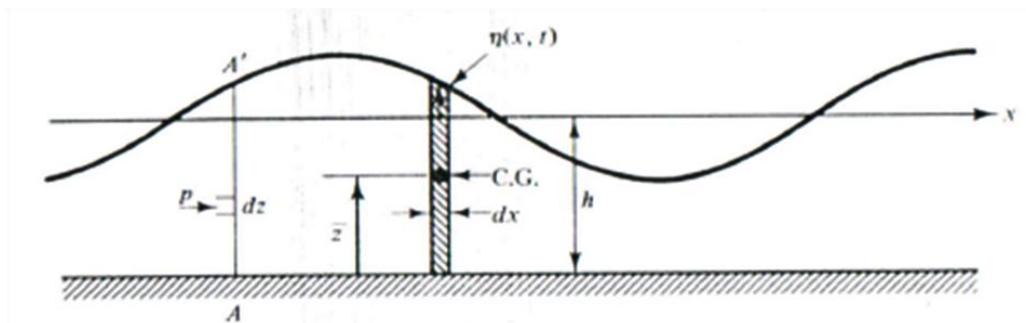


Fig. 26 - Schematizzazione onda

Il differenziale della massa per unità di profondità:

$$dm = \rho(h+\eta)dx$$

L'energia potenziale mediata su una lunghezza d'onda per un'onda di altezza H è:

$$\overline{PE_{tot}} = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} d(PE) = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \frac{\rho g (h+\eta)^2}{2} dx = \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \left[ \frac{1}{2} (h^2 + 2h\eta + \eta^2) \right] dx$$

Per  $\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$

$$\overline{PE}_{tot} = \frac{\rho g}{L} \left( \frac{1}{2} h^2 L + h \int_x^{x+L} \eta dx + \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \eta^2 dx \right)$$

$$\overline{PE}_{tot} = \frac{\rho g h^2}{2} + \frac{\rho g H^2}{16}$$

L'energia potenziale delle onde è data dalla differenza tra l'energia potenziale in presenza di onde e in assenza di onde.

$$\overline{PE}_{waves} = \overline{PE}_{tot} - \overline{PE}_{w/o}$$

$$\overline{PE} = (\overline{PE})_{waves} = \frac{\rho g H^2}{16}$$

L'energia potenziale delle onde per unità di area dipende esclusivamente dall'altezza d'onda H.

Considerando che  $\eta = \sum_{i=1}^N a_i \cos(kx - \omega t)$

$$\overline{PE} = \frac{\rho g}{16} \sum_{i=1}^N H_i^2$$

L'energia cinetica è dovuta al movimento delle particelle d'acqua che costituiscono l'onda, associata a una piccola parte di fluido di massa dm è

$$d(KE) = dm \frac{u^2 + v^2}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + v^2}{2}$$

Per trovare l'energia cinetica media per unità di area d(KE) deve essere integrata per la profondità d'acqua e mediata sulle lunghezza d'onda:

$$\overline{KE} = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + v^2}{2} dz dx$$

$$\overline{KE} = \frac{\rho}{2L} \left( \frac{g h k}{2\omega} \frac{1}{\cosh kh} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} [\cosh^2 k(z+h) \cos^2(kx - \omega t) + \sinh^2 k(z+h) \sin^2(kx - \omega t)]$$

dz dx

Che per le proprietà trigonometriche diventa:

$$\overline{KE} = \frac{\rho}{2L} \left( \frac{g h k}{2\omega} \frac{1}{\cosh kh} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2} [\cosh 2k(z+h) + \cosh(kx - \omega t)] dz dx$$

Integrando diventa:

$$\overline{KE} = \frac{1}{16} \rho g H^2$$

A questo punto l'energia totale diventa la somma della cinetica e potenziale:

$$E = \overline{KE} + \overline{PE} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \text{ energia totale media per unità di area}$$

Le onde non trasmettono massa ma trasmettono energia.

Il rateo di energia trasferita è chiamato flusso di energia  $\Phi$ , per la teoria lineare è dato dal rateo di lavoro fatto dal fluido da un lato sull'altro della sezione. Per la sezione verticale AA' (Fig.25) il rateo istantaneo di lavoro fatto dalla pressione dinamica  $Pd = (P + \rho g z)$  per unità di profondità e nella direzione di propagazione dell'onda è:

$$\Phi = \int_{-h}^{\eta} Pd u dz.$$

Il flusso di energia medio è ottenuto mediando sul periodo dell'onda

$$\overline{\Phi} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} Pd u dz dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} [\rho g \eta \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}] [\frac{g h k}{2\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(kx - \omega t)] dz dt$$

$$\overline{\Phi} = \overline{\Phi} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} [\rho g \eta \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}] [\omega \eta \frac{\cosh h(z+h)}{\sinh kh}] dz dt \quad \text{avendo utilizzato la relazione di dispersione.}$$

Per mantenere termini del secondo ordine dell'altezza d'acqua, è necessario integrare fino al livello medio mare ( $z = 0$ )

$$\overline{\Phi} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 [\rho g \eta^2 \omega \frac{\cosh^3 k(z+h)}{\cosh kh \sinh kh}] dz dt$$

$$\overline{\Phi} = \frac{\rho g \eta}{4k} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \frac{(2kh + \sinh 2kh)}{\sinh 2kh}$$

$$\overline{\Phi} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2\right) \frac{\omega}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right)\right]$$

$$\overline{\Phi} = ECn$$

dove  $Cn$  è la velocità di trasferimento dell'energia, questa velocità viene chiamata velocità di gruppo  $C_g$ :

$$C_g = nC$$

$$\text{Oppure } n = \frac{c_g}{c} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

Per acque alte  $n = \frac{1}{2}$ , l'energia viene trasmessa a metà della velocità del profilo d'onda.

$$\text{Si dimostra che affinché } P = \int \gamma C_g E(f) df = \frac{\gamma H_{m0}^2}{16} C_{ge}, \quad T_{m0,-1} = \frac{m_0}{m_1}$$

Ipotesi:

- In acque alte  $C_g = C_{ge}$
- Nel calcolo di  $C_g$  uso  $T = T_{m0,-1}$

La potenza associata al moto ondoso è  $P = \gamma \frac{H^2}{8} n C$ , che in acque alte può essere scritta

$$\text{come } P_o = \frac{1}{2} \gamma \frac{H^2}{8} Lf$$

$$\text{dove } L \text{ in acque alte vale } \frac{gT^2}{2\pi}$$

$$\text{Dall'analisi spettrale } \int_0^\infty E(f) df = m_0$$

$$E = \frac{\gamma H^2}{8} = \int \gamma E(f) df$$

$$H = \frac{4}{\sqrt{2}} \sqrt{\int E(f) df}$$

$$\text{Considerando che } H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \rightarrow H = \frac{H_{m0}}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{\gamma H^2}{8} = \frac{\gamma (H_{m0}/\sqrt{2})^2}{8} = \frac{\gamma H_{m0}^2}{16}$$

Viene cercata una celerità equivalente  $C_{ge}$  tale che tutta la potenza possa essere calcolata

$$\text{come: } P = \frac{\gamma H_{m0}^2}{16} C_{ge}$$

$$P = \int \gamma C_g E(f) df = \frac{\gamma H_{m0}^2}{16} C_{ge}$$

$$C_{ge} = \frac{\int C_g E(f) df}{\frac{H_{m0}^2}{16}} = \frac{\int C_g E(f) df}{\int E(f) df}$$

$$C_{ge} = \frac{g}{2\pi} \frac{\int f^{-1} E(f) df}{\int E(f) df} = \frac{1}{2} \frac{g}{2\pi} T_{m0,-1} \rightarrow T_{m0,-1} = \frac{m_0}{m_1} \quad \text{C.V.D. [ 2 ].}$$

## **4. Valutazione della potenza del moto ondoso nell'Alto Tirreno**

### **4.1. Che cosa è un file NetCDF**

Introduciamo ora che cosa è un file NetCDF che, come vedremo, è un formato file che è stato utilizzato per il calcolo delle potenze. Il Network Common Data Form (NetCDF) è sviluppato e distribuito sotto licenza GPL dalla University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), a partire dal modello concettuale della NASA CDF, ed è ampiamente utilizzato per la gestione di dati multidimensionali. NetCDF è costituito da un insieme di librerie software e formati di dati, indipendenti dalla piattaforma utilizzata, che supportano la creazione, l'accesso e la condivisione di dati scientifici array-oriented. Il NetCDF consente un accesso diretto ai dati senza necessariamente conoscere i dettagli relativi alla sua memorizzazione. Correlati ai dati ci sono informazioni ausiliari quali ad esempio l'unità di misura relativa, questo consente a qualsiasi applicazione o utility di accedere ai datasets di tipo NetCDF al fine di elaborare, combinare o visualizzare i dati o parte di essi. Uno degli obiettivi del NetCDF è quello di consentire un accesso ai dati, indipendentemente dalla dimensione del datasets, avvalendosi di un accesso diretto piuttosto che sequenziale. Tale caratteristica risulta particolarmente vantaggiosa nel caso in cui i dati vengano letti in ordine diverso da quello di memorizzazione. E' utilizzato, per queste caratteristiche, per applicazioni meteorologiche, oceanografiche e GIS [ 3 ].

### **4.2. Valutazione della potenza del moto ondoso nell'Alto Tirreno**

Come già detto, lo scopo di questa tesi è di valutare la potenza media dei mesi di disponibilità dei dati e di valutare e confrontare le potenze medie mensili nel Mare Mediterraneo Nord Ovest e più nel particolare nell'Alto Tirreno e Mar Ligure.

I dati messi a disposizione dal polo Oceanografico costiero PREVIMER, con sede a Brest (Francia), sono raccolti in file NetCDF, ognuno dei quali contiene dati relativi a 3 ore di osservazione dello stato del mare, tra questi sono compresi la frequenza di picco, l'altezza significativa, il periodo medio, la direzione ecc. I dati che sono stati presi in considerazione si riferiscono alla zona del Mare Mediterraneo Nord Ovest e sono rappresentati tramite una

griglia di 241 valori di longitudine e 151 valori di latitudine ed ha estremi, rispettivamente di  $-1^\circ$ ,  $11^\circ$  e  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ .

Dalla formula della potenza del moto ondoso,  $P = \frac{1}{2} \frac{\rho H_{m0}^2 g}{16} \frac{g}{2\pi} T_{energetico}$ , si nota che le uniche variabili necessarie per calcolare P sono  $H_{m0}$  e  $T_{energetico}$ . L' $H_{m0}$  è fornito direttamente per ogni valore di longitudine e latitudine, mentre il  $T_{energetico}$  è stato ricavato utilizzando la relazione  $T_{energetico} \approx 0.9 fp^{-1}$ , dove con fp ho è indicata la frequenza di picco fornita nei file. Grazie alle caratteristiche dei file NetCDF, è stato possibile elaborare questi file con il programma di calcolo Matlab per raccogliere i dati per il calcolo della potenza. E' riportato di seguito un esempio dei comandi (scritti con carattere più piccolo) che sono stati utilizzati per ricavare la potenza in ogni punto della griglia, prendendo a campione il file \_WW3-MENOR-4000M\_20090702T15Z, relativo al giorno 02 luglio 2009 alle ore 15.00:

Per aprire la struct array necessaria ho utilizzato i due comandi

```
>>nc = netcdf('E:/lfremer/2009/SHOM_WW3-MENOR-4000M_20090702T15Z.nc')
```

```
>>f = getfield(nc,'VarArray')
```

dove con questo comando si rendono disponibili i campi del 'VarArray' in una variabile 'f'. Successivamente, con il comando

```
>>pippo=(f(8).Data(1,1,:,:));
```

si restituisce alla variabile 'pippo' i dati dell'ottava colonna di 'f', che contiene i valori dell'altezza significativa  $H_{m0}$ ;

```
>>a1=zeros(151,241);
```

```
>>for i=1:151
```

```
>>for j=1:241
```

```
>>a1(i,j)=pippo(1,1,i,j);
```

```
>>end
```

```
>>end
```

in questo modo è stata trasformata la matrice a quattro dimensioni 'pippo' in una matrice a due dimensioni di 151x241 (latitudine x longitudine) di nome 'a1'. La matrice 'a1', per ogni valore di longitudine e latitudine, fornisce il valore dell'altezza significativa corrispondente.

Con il comando

```
>>pippo1=(f(7).Data(1,1,,:));
```

si restituisce alla variabile 'pippo1' i dati della settima colonna di 'f', che contiene i valori della frequenza di picco 'fp', come in precedenza si trasforma da una matrice a quattro dimensioni a una matrice a due dimensioni di nome 'a2' con 151 valori di latitudine e 241 di longitudine:

```
>>a2=zeros(151,241);
```

```
>>for i=1:151
```

```
>>for j=1:241
```

```
>>a2(i,j)=pippo1(1,1,i,j);
```

```
>>end
```

```
>>end
```

Poiché la frequenza di picco per valori di longitudine e latitudine corrispondenti alla terra ha valori infinitamente piccoli e il  $T_{energetico}$  si calcola come  $T_{energetico} = a = 0.9*(a2.^{-1})$ , per rendere più chiaro il grafico (di  $T_{energetico}$ ), si pone che per valori di  $a2(i,j) \leq 0$  si ottenga un valore molto grande ( $3.400e+038$ ) in modo tale che  $a2^{-1}$ , per le coordinate di terra, si possa approssimare a zero:

```
>>for i= 1:151
```

```
>>for j = 1:241
```

```
>>if a2(i,j) <= 0
```

```
>>a2(i,j) = 3.400e+038;
```

```
>>else a2(i,j) = a2(i,j);
```

```
>>end
```

```
>>end
```

```
>>end
```

```
>>a = 0.9*(a2.^{-1});
```

Si calcola, ora, la potenza in ogni punto della griglia (151x241) utilizzando la formula ricavata in precedenza

$$P = \frac{1}{2} \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}}^2 g}{16 \cdot 2\pi} T_{energetico} :$$

```
>>P = 492.23*a1.^2;
```

```

>>for i= 1:151

>>for j = 1:241

>>if P(i,j) <= 0

>>P(i,j) = 0;

>>else P(i,j) = P(i,j);

>>end

>>end

>>end

>>P2009070215 = P.*a;

>>max(max(P2009070215))

>>min(min(P2009070215))

```

con questi ultimi due comandi, Matlab restituisce i valori della massima e minima potenza delle tre ore di campionamento del 2 luglio 2009 alle ore 15.00.

Al termine di questo calcolo sono stati plottati i valori delle potenze dei punti della griglia utilizzando il comando

```

>>pcolor (P2009070215); shading interp

```

il pcolor (P2009070215) disegna un grafico a colori visto dall'alto costituito da una matrice rettangolare di celle con colori rappresentativi delle potenze per tutti i valori di longitudine e latitudine di P2009070215. Con il comando shading ciascuna cella ha un colore costante.

Utilizzando il comando

```

>>contourf(P2009070215)

```

è stato ottenuto il grafico delle curve di livello della potenza (Fig.27):

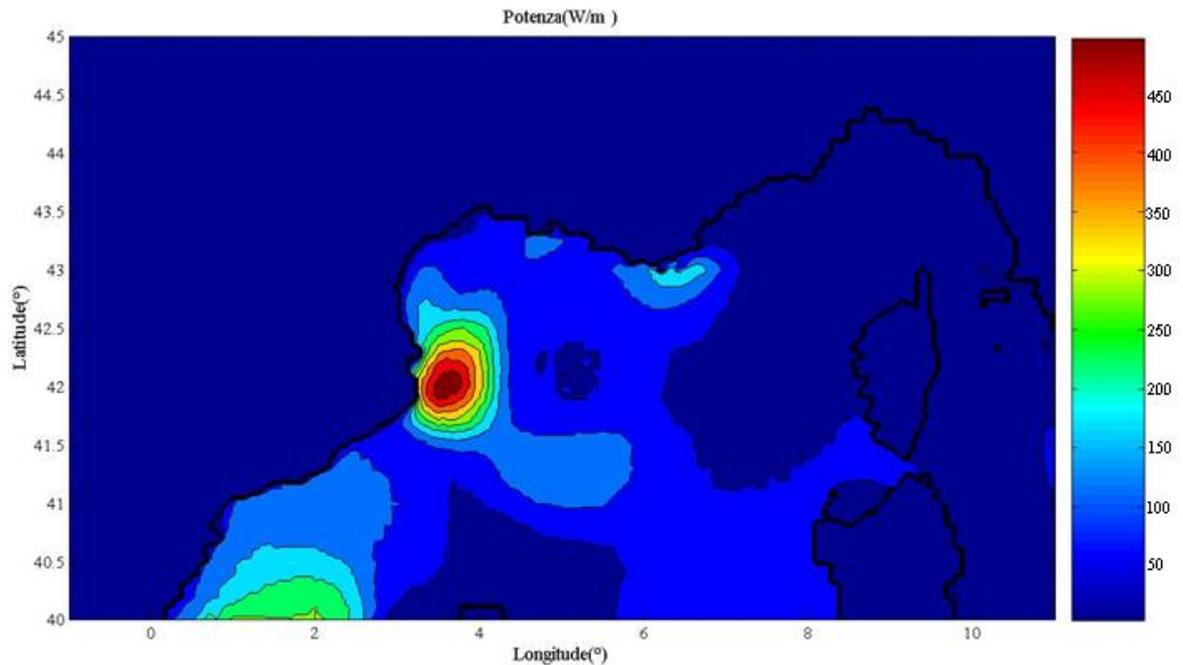


Fig. 27 - Potenza (W/m) del 2 luglio dell'anno 2009 alle ore 15.00

Questa procedura è stata iterata per ogni file rappresentativo di tre ore, per ogni giorno del mese (8 file per ogni giorno), e per calcolare la potenza media mensile (ad esempio di luglio) mediata sui giorni del mese di riferimento ( in questo caso 31) ho utilizzato la sommatoria  $P_{luglio} = \frac{1}{31} \sum_{i=1}^{31} P_i$ , dove con  $P_i$  ho indicato la potenza media giornaliera (media delle 8 potenze triorarie).

Sono riportati i grafici a curve di livello (utilizzando il comando pcontourf) della potenza media del mese di luglio 2009, uno riguardante tutta la zona del Mar Mediterraneo Nord-Ovest (Fig.28), uno riguardante il dettaglio dell'Alto Tirreno e Mar Ligure (Fig.29):

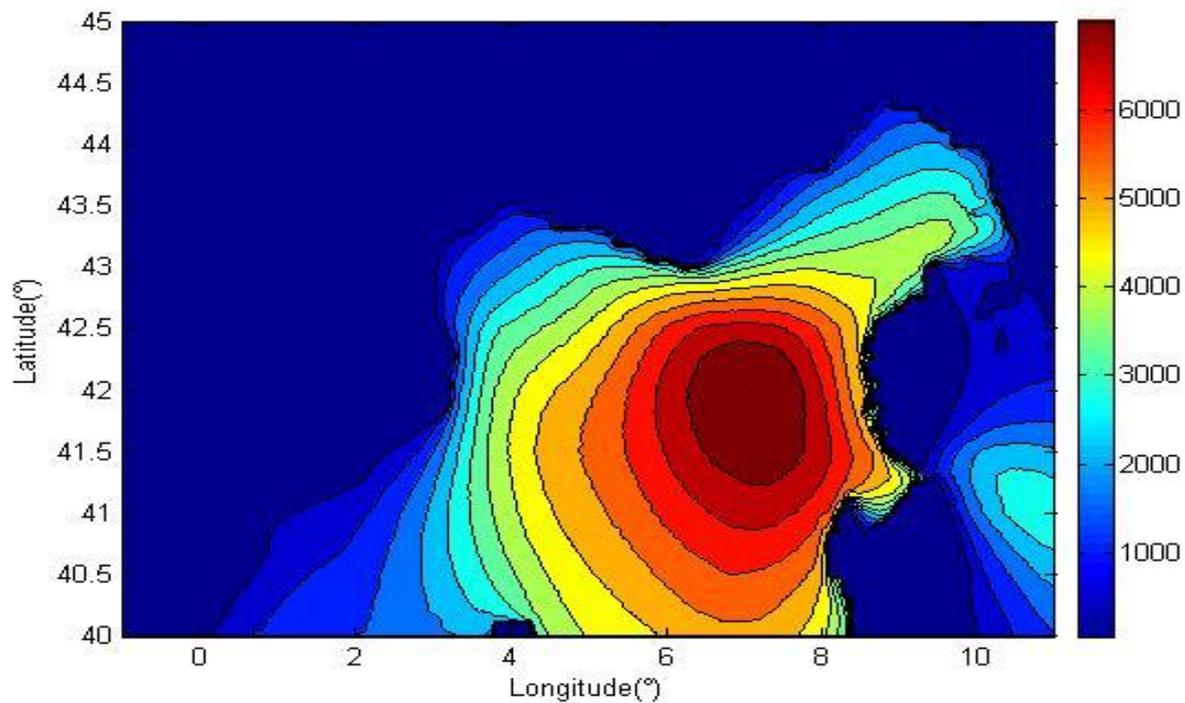


Fig. 28 - Potenza media(W/m) del mese di LUGLIO 2009

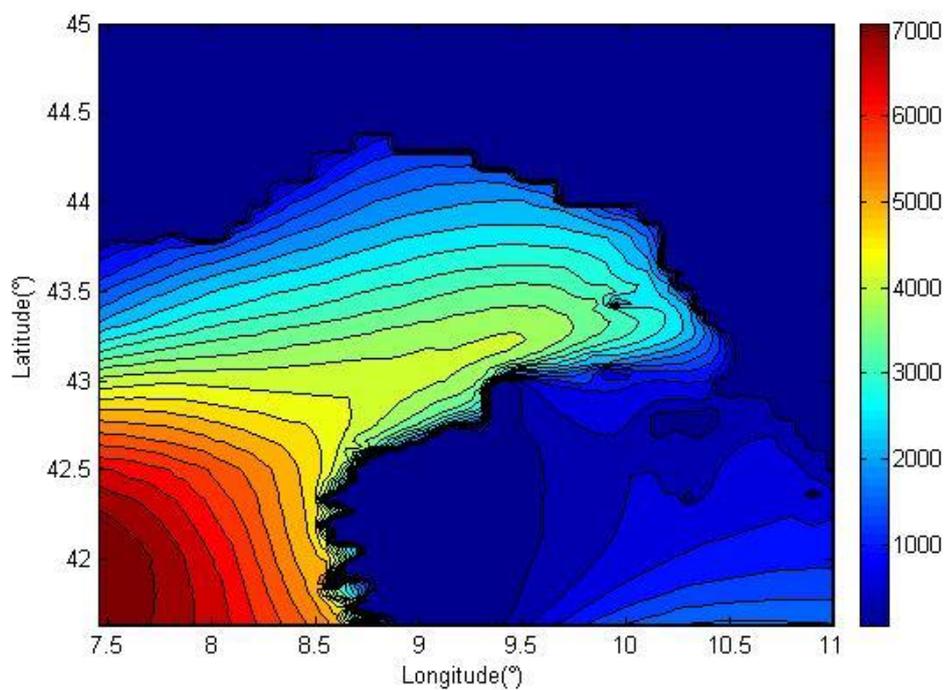


Fig. 29- Potenza media(W/m) del mese di LUGLIO 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

Seguendo questo procedimento per i mesi che vanno da luglio 2009 ad aprile 2010, sono stati ottenuti i grafici che rappresentano le potenze medie mensili del Mar mediterraneo Nord-Ovest, riportati in appendice A. In appendice B, invece, sono riportati i grafici delle

potenze medie mensili raffiguranti la sola zona dell'Alto Tirreno e del Mar Ligure delineati ognuno da 25 curve di livello.

Per trovare la potenza media dei dieci mesi di disponibilità dei dati è stata fatta la somma delle potenze medie mensili che vanno dal mese di luglio 2009 ad aprile 2010 e questa è stata divisa per 10 (Fig.30-31).

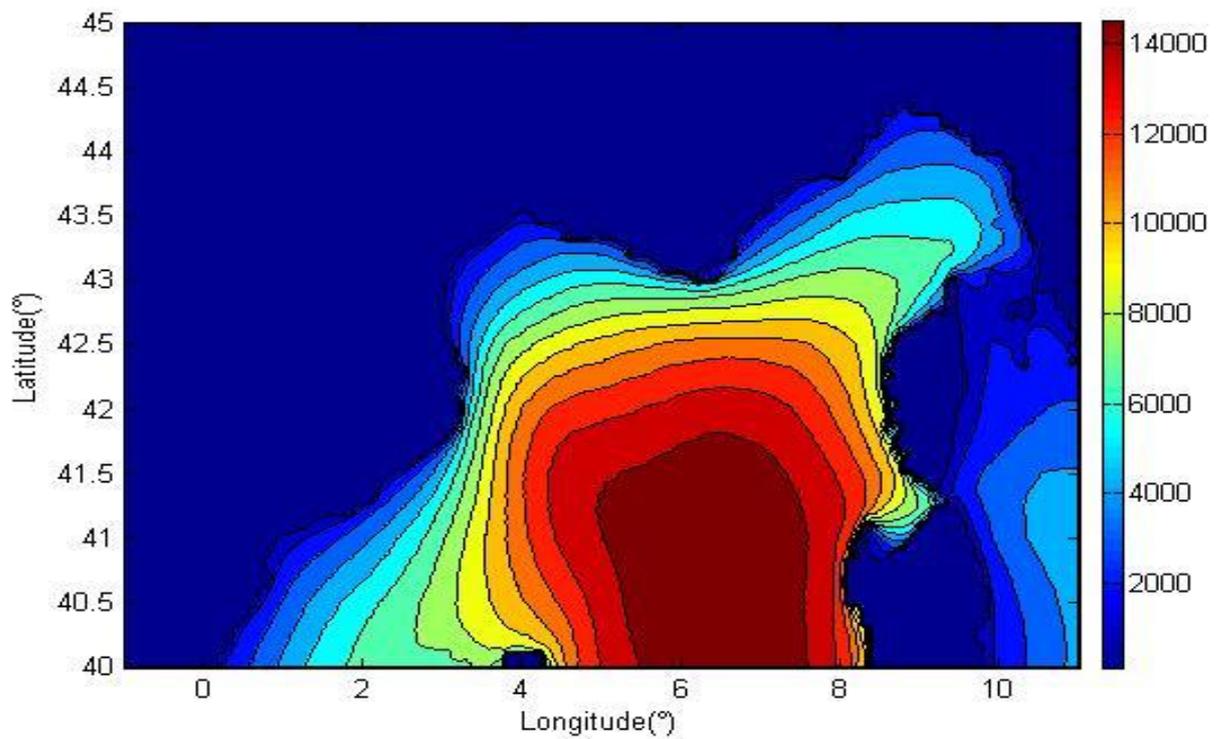


Fig. 30 – Potenza media (W/m) dei dieci mesi di disponibilità dei dati

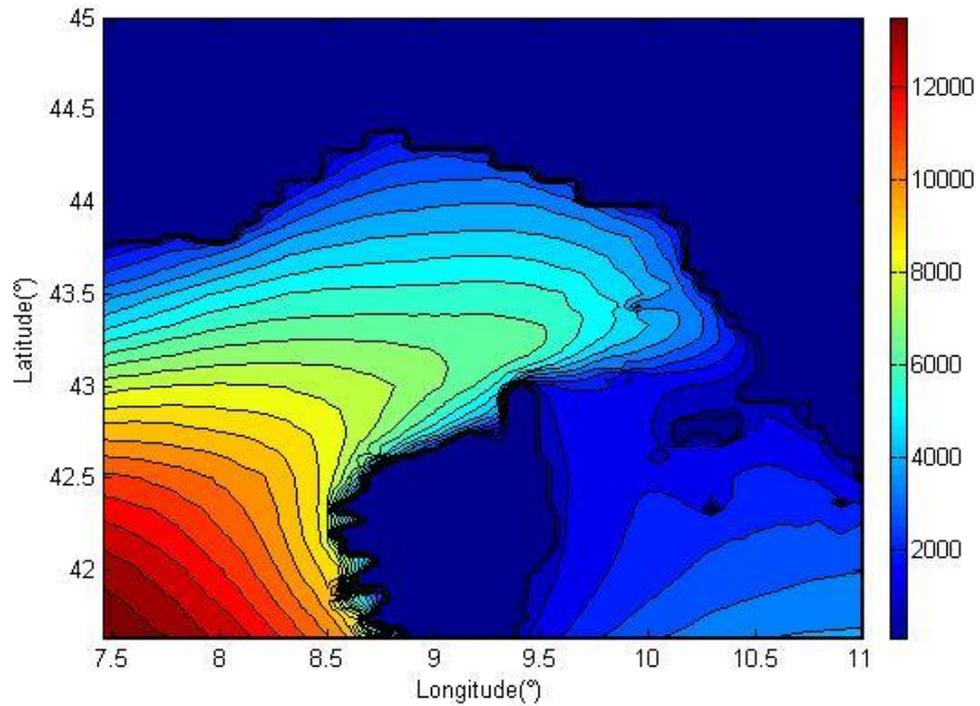


Fig. 31 – Potenza media(W/m) dei dieci mesi di disponibilità dei dati, dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

I grafici della distribuzione spaziale delle potenze d'onda evidenziano che la zona maggiormente energetica è quella del Mediterraneo occidentale (Fig.30). Nel grafico in Fig.32 viene mostrata la variabilità mensile del punto del mediterraneo maggiormente energetico. Si nota come le potenze sono maggiori nei mesi autunnali e invernali, come era semplice intuire data la maggiore intensità del vento in queste stagioni, minori nei mesi estivi. Il mese in cui la potenza è maggiore è il mese di Gennaio dove si arriva a 32 kW/m. La zona in cui le potenze sono massime è la zona che si trova tra l'isola della Corsica, della Sardegna e dell'isola di Minorca (intorno alle coordinate di  $6^{\circ}5'$  di longitudine e  $40^{\circ}5'$  di latitudine).

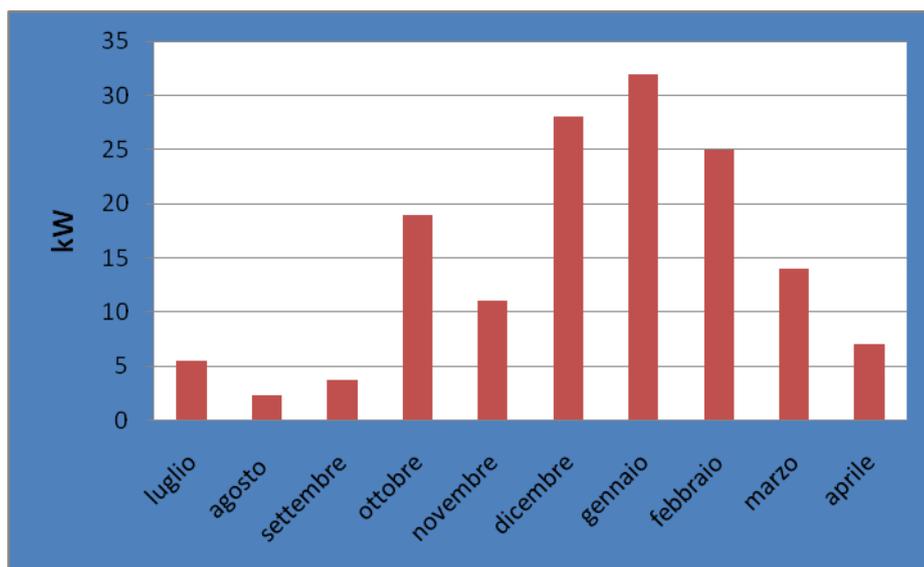


Fig. 32 - Istogramma delle potenze mensili del punto del mediterraneo maggiormente energetico (kW/m)

### 4.3. Valutazione delle potenze disponibili in vari siti portuali costieri

Ipotizzando che un WEC (Wave Energy Converter) possa essere collocato su dighe foranee di porti, sono stati scelti dieci siti che si trovano all'interno delle batimetriche di 50 e 100 metri davanti ad alcune strutture portuali lungo la costa dell'Alto Tirreno e del Mar Ligure. Le coordinate di latitudine e longitudine dei siti individuati sono riportate nella Fig.33 ed individuate geograficamente nella Fig.34.

Siti	Latitudine	Longitudine
Genova	44°20'	8°53'
Chiavari	44°15'	9°16'
Carrara	43°57'	9°49'
Viareggio	43°51'	9°54'
Pisa	43°41'	10°09'
Livorno	43°32'	10°03'
Vada	43°20'	10°16'
Piombino	42°49'	10°38'
Castiglione della Pescaia	42°42'	10°48'
Marina di Grosseto	42°40'	10°54'

Fig. 33 - Latitudine e longitudine dei dieci siti



Fig. 34 - Posizione geografica dei dieci siti

Dalle potenze medie giornaliere, ricavate come somma delle potenze triorarie divise per 8, è stato ricavato il valore puntuale in corrispondenza dei siti suddetti. Ad esempio per il sito di Genova, che ha coordinate (44°20', 8°53') sono stati utilizzati i comandi:

```
>> a = ( P2009080200+ P2009080203+ P2009080206+ P2009080209+ P2009080212+ P2009080215+
P2009080218+ P2009080221 )/8;
```

a è la potenza giornaliera del giorno 02/08/2009.

```
>> a ( 127x92)
```

Viene fornito il valore puntuale della potenza giornaliera che corrisponde alle coordinate di latitudine 44°20' e longitudine 8°53'.

Questo procedimento è stato ripetuto per i dieci siti presi in considerazione e per tutti i giorni dei dieci mesi (nel mese di luglio manca il dato relativo al primo giorno e nel mese

di aprile mancano i dati relativi ai giorni dal 18 aprile a fine mese). In Appendice C sono riportati i grafici delle potenze medie giornaliere per ogni sito.

In tutti i siti, i periodi in cui le potenze medie giornaliere sono minori, sono nei mesi estivi e in particolare nel mese di agosto e nel periodo che va da metà settembre a metà ottobre. Le potenze medie giornaliere più alte si riscontrano nei mesi di dicembre-gennaio-febbraio. Nei siti di Viareggio, Pisa, Livorno e Vada si hanno potenze medie giornaliere piuttosto alte anche nei mesi di marzo e aprile.

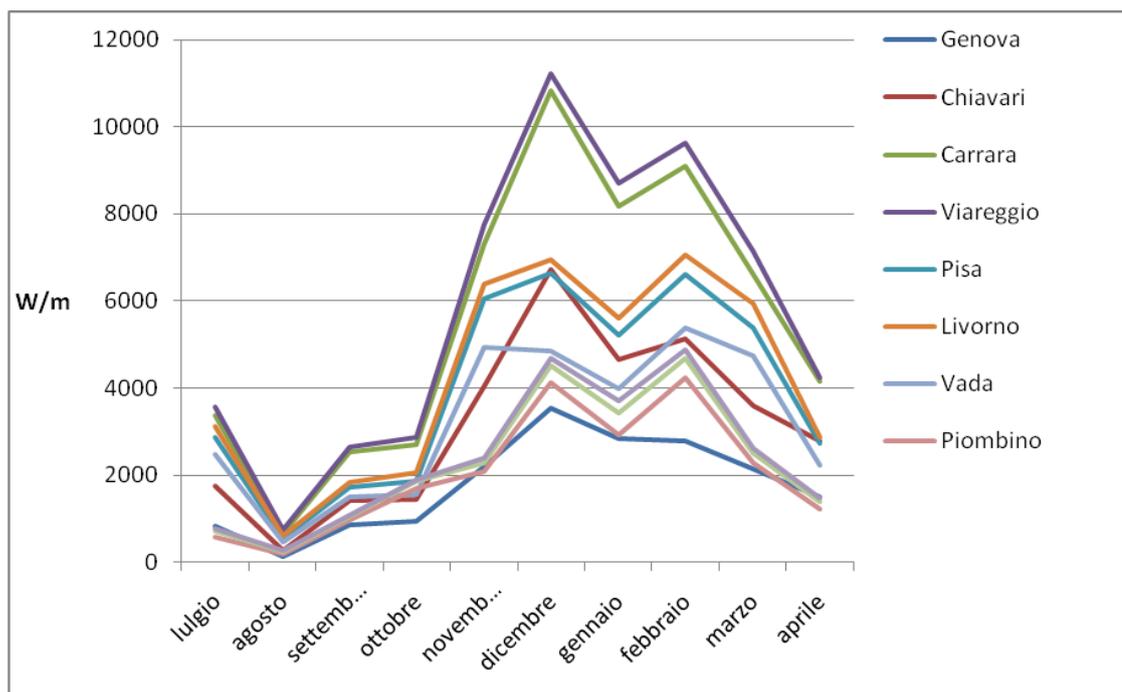


Fig. 35 – Diagramma delle potenze medie mensili dei dieci siti

Dal grafico di Fig. 35, dove sono riportate le potenze medie mensili dei dieci siti presi in considerazione, possiamo notare che i mesi maggiormente “energetici” sono, per quasi tutti i siti, come è stato sottolineato in precedenza, i mesi invernali di dicembre-gennaio-febbraio. Si può notare inoltre una sostanziale differenza di potenza tra i vari siti. Questo aspetto è reso ancora più evidente dal grafico sottostante, Fig. 36, in cui si riportano le potenze medie dei dieci mesi di disponibilità energetica. Da questo grafico si può notare che le potenze medie dei dieci mesi di disponibilità energetica più alte si trovano tra le batimetriche di 50 e 100 metri davanti a Viareggio (circa 5,8 kW/m), Carrara (circa 5,5 kW/m) e Livorno (circa 4,2kW/m), mentre quelle più basse, si trovano tra le batimetriche di 50 e 100 metri davanti a Genova (circa 1,7 kW/m), Piombino (circa 2kW/m) e Castiglione della Pescaia (circa 2,2kW/m). I suddetti dati mostrano che la potenza più bassa tra i dieci siti è stata riscontrata a Genova in quanto il suo settore di traversia,

definito come l'angolo che comprende tutte le direzioni dalle quali spira il vento generando onde che possono raggiungere la costa, è fortemente limitato dalla costa ligure. Per quanto riguarda Piombino e Castiglione della Pescaia si riscontrano valori bassi in quanto i loro fetch sono limitati dalla presenza delle isole della Corsica e dell'Elba. Viareggio, Carrara e Livorno hanno un ampio settore di traversia e fetch piuttosto lunghi, queste caratteristiche aiutano il raggiungimento di potenze relativamente alte.

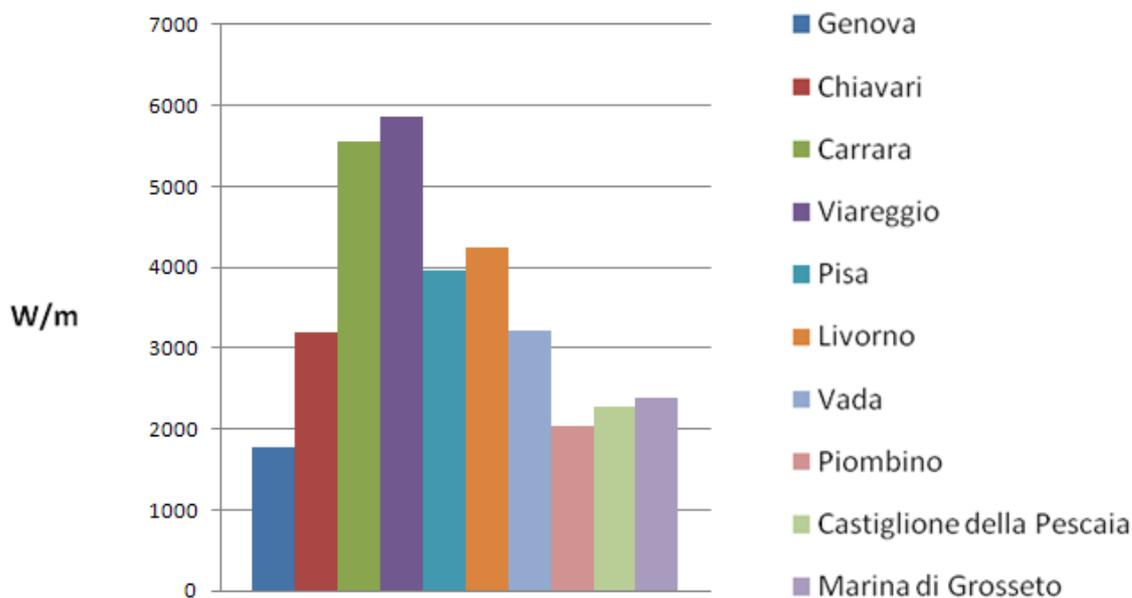


Fig. 36 - Istogramma delle potenze medie dei dieci mesi di disponibilità energetica dei dieci siti

## Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è di valutare la potenza media dei dieci mesi di disponibilità dei dati (da luglio 2009 ad aprile 2010) e le potenze medie mensili del moto ondoso nella zona del Mar Mediterraneo Nord-Ovest. Dai risultati ottenuti è emerso che le potenze sono maggiori nei mesi autunnali e invernali. Si è notato inoltre che la potenza maggiore è localizzata nel Mediterraneo occidentale, più precisamente nella zona che si trova tra l'isola della Corsica, della Sardegna e dell'isola di Minorca (intorno al punto di coordinate di 6°5' di longitudine e di 40°5' di latitudine), in cui nel mese di Gennaio si toccano i 32 kW/m. Dall'analisi dei dieci siti presi in considerazione, Viareggio e Carrara sono quelli maggiormente energetici, la loro potenza media dei dieci mesi di disponibilità dei dati, è rispettivamente di 5,8 e 5,5 kW/m.

**Appendice A** – Grafici delle potenze medie mensili del Mar Mediterraneo Nord-Ovest

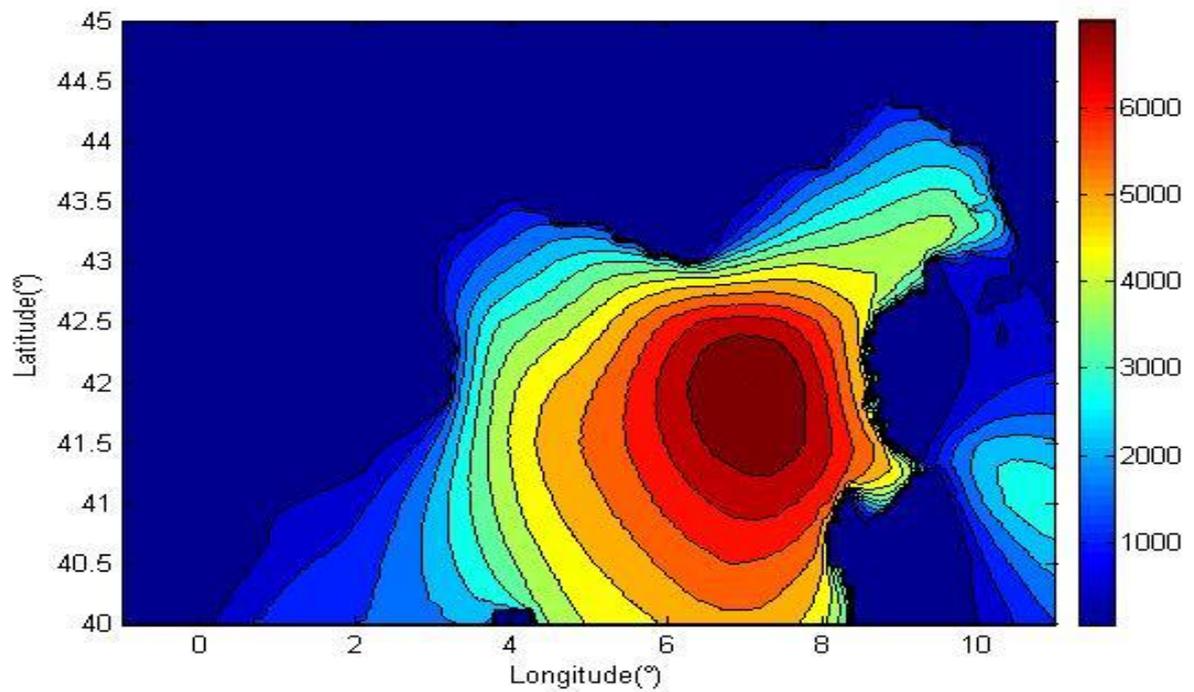


Fig. 37 – Potenza media(W/m) del mese di LUGLIO 2009

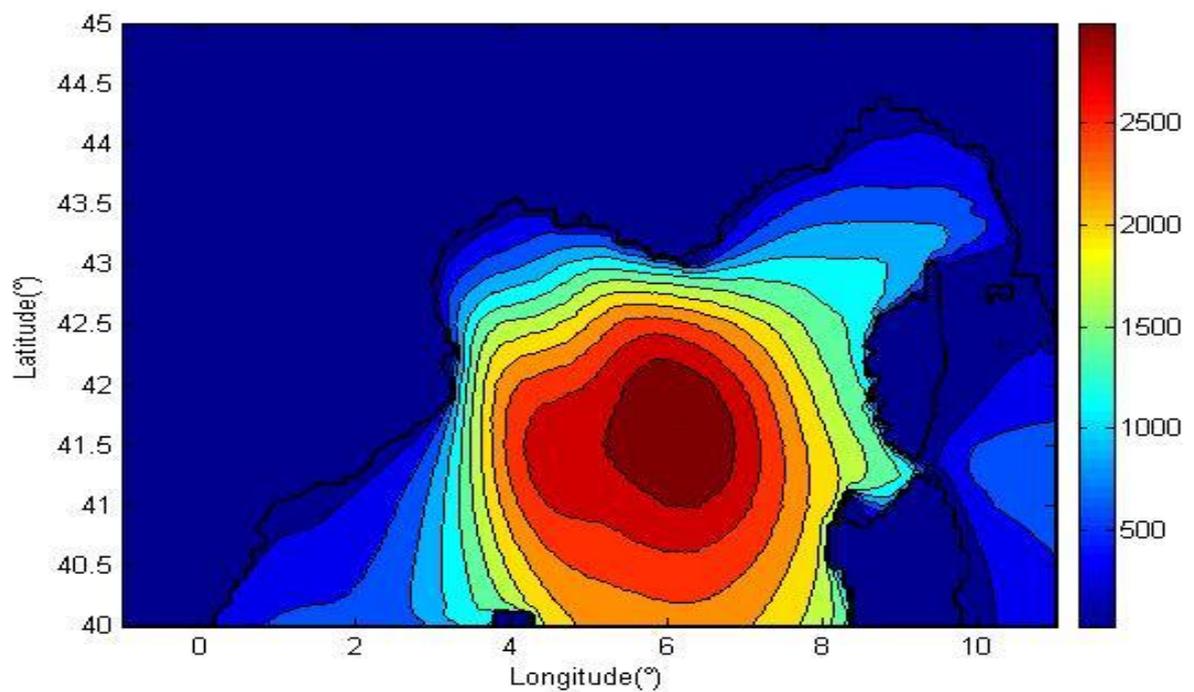


Fig. 38 - Potenza media(W/m) del mese di AGOSTO 2009

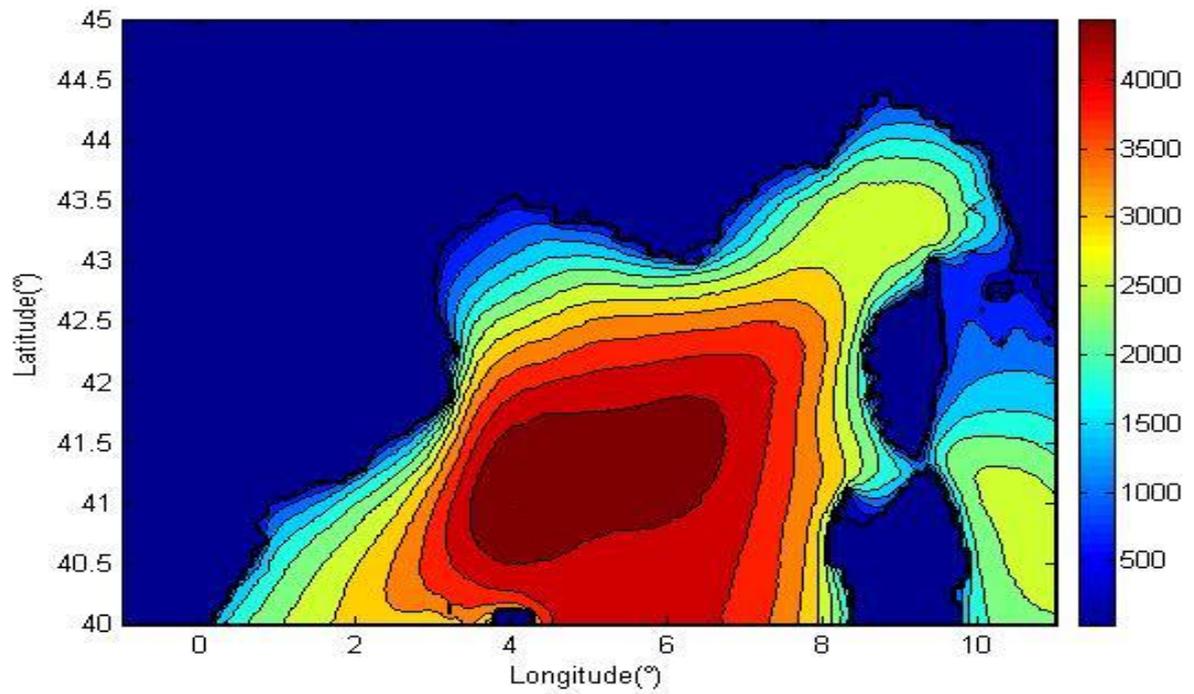


Fig. 39 - Potenza media(W/m) del mese di SETTEMBRE 2009

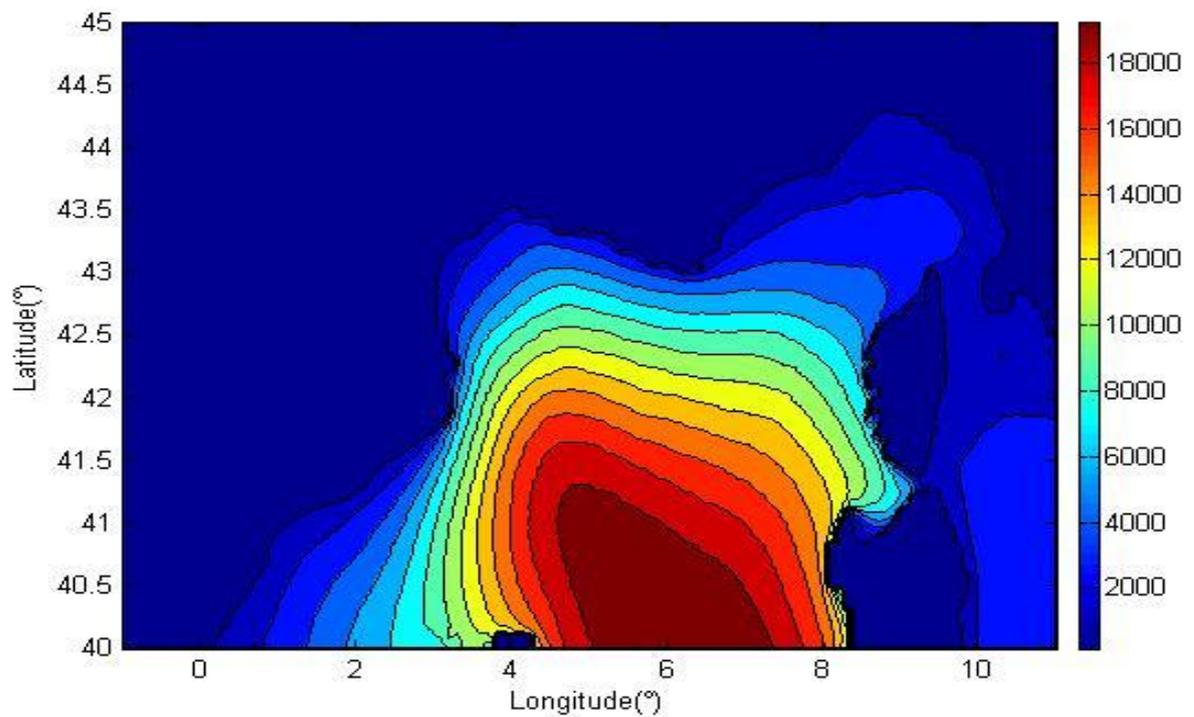


Fig. 40 - Potenza media(W/m) del mese di OTTOBRE 2009

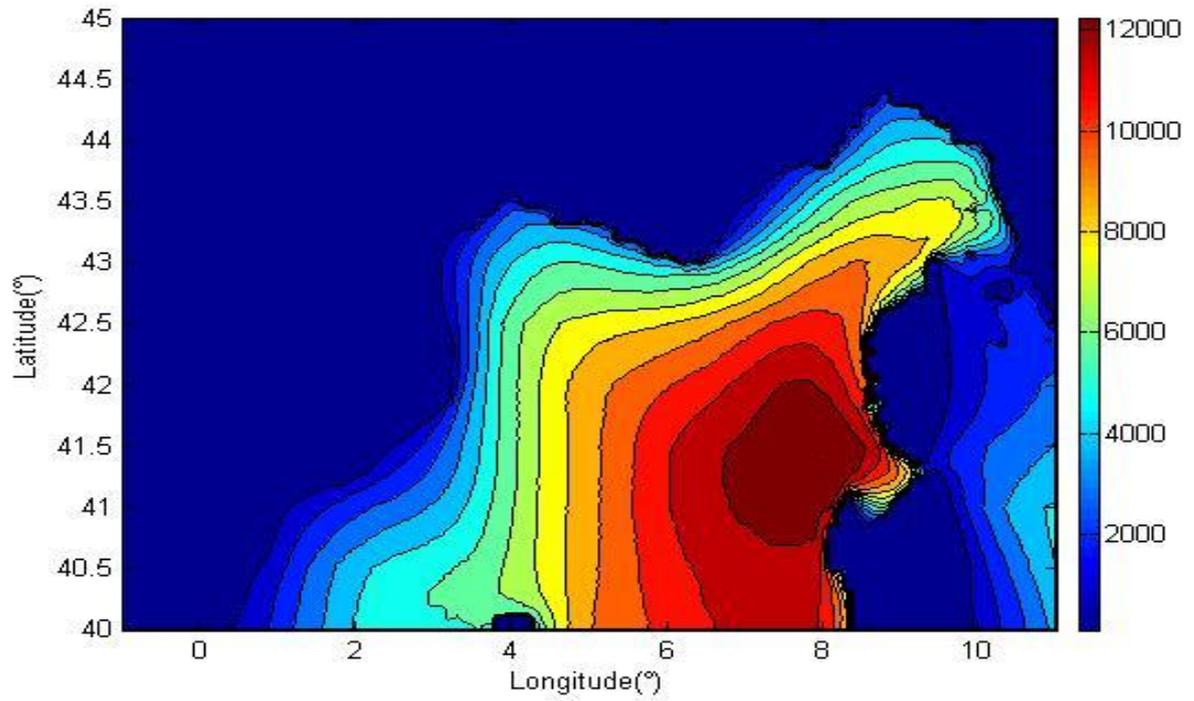


Fig. 41 - Potenza media(W/m) del mese di NOVEMBRE 2009

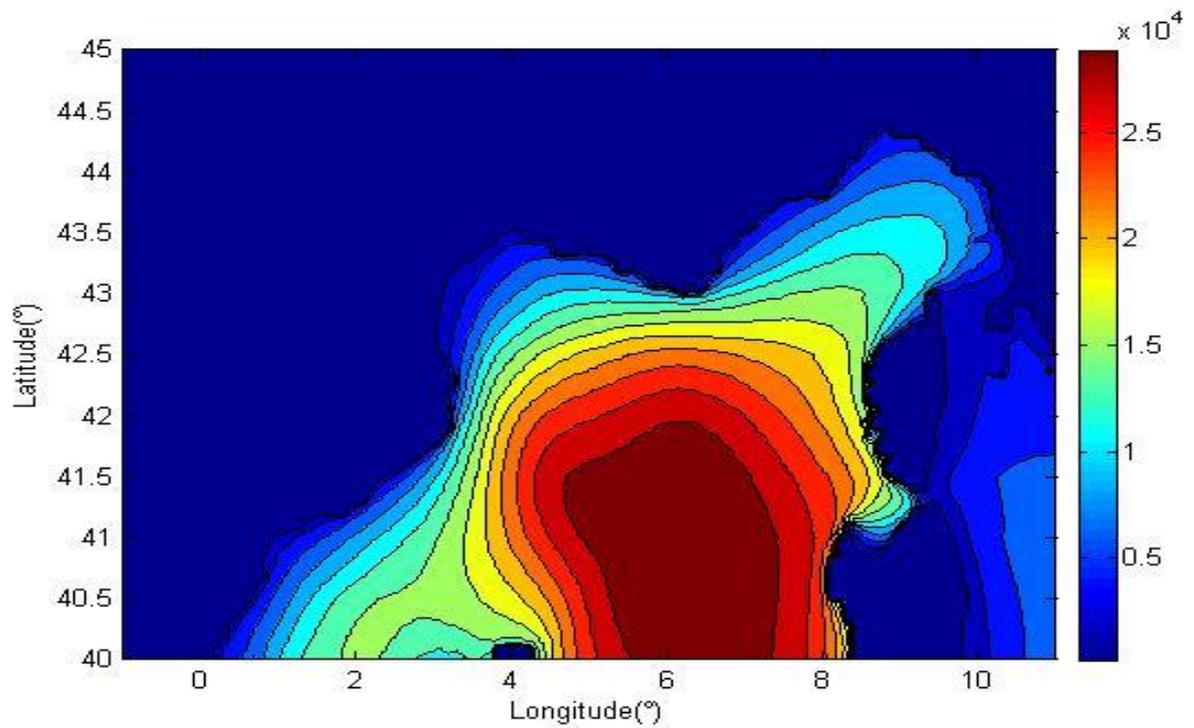


Fig. 42 - Potenza media(W/m) del mese di DICEMBRE 2009

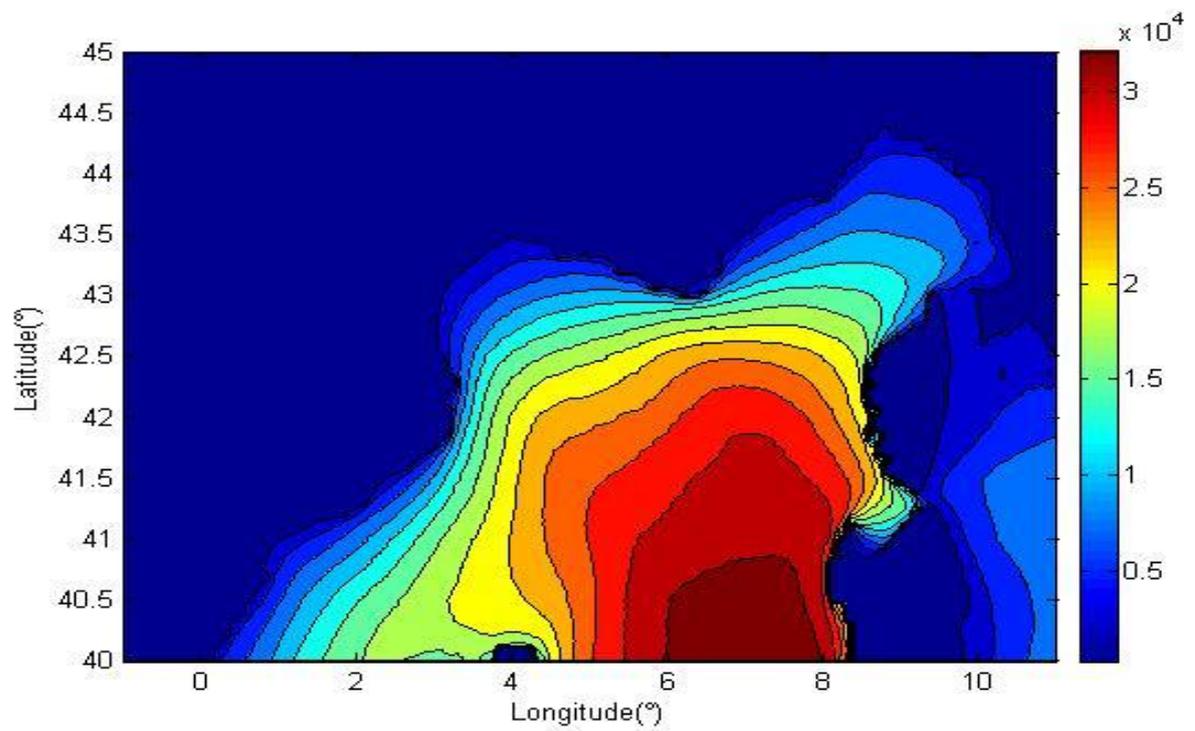


Fig. 43 - Potenza media(W/m) del mese di GENNAIO 2010

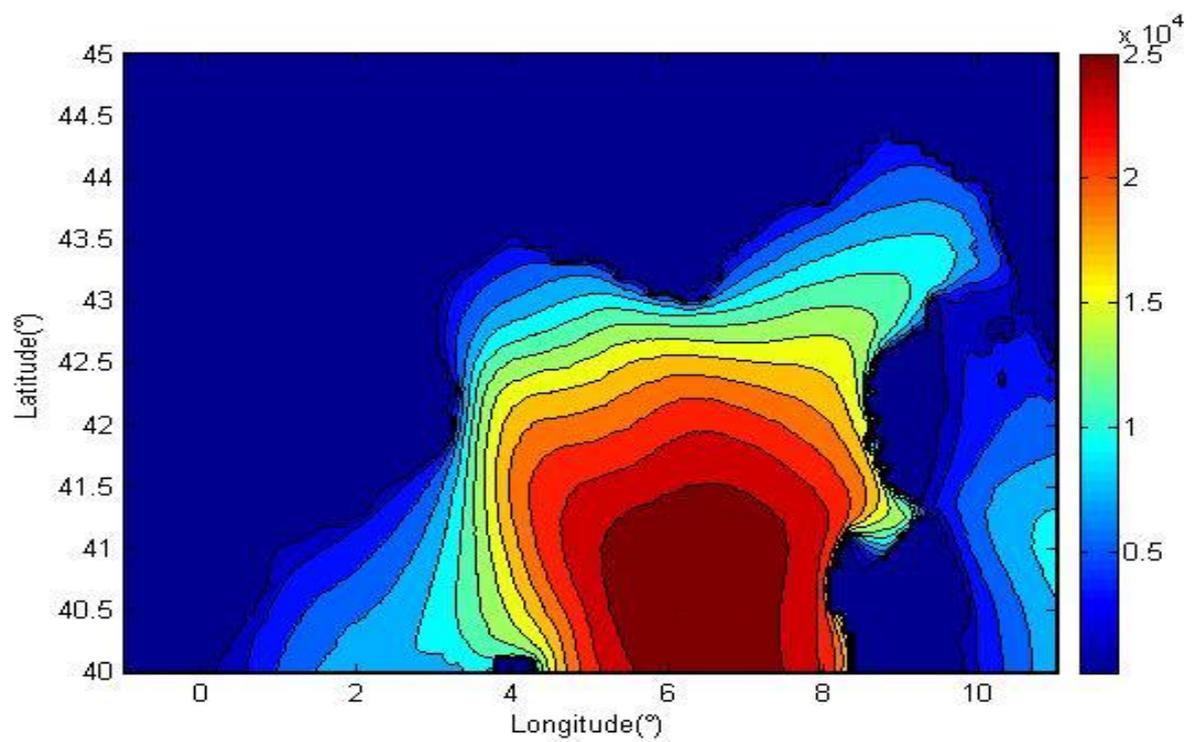


Fig. 44 - Potenza media(W/m) del mese di FEBBRAIO 2010

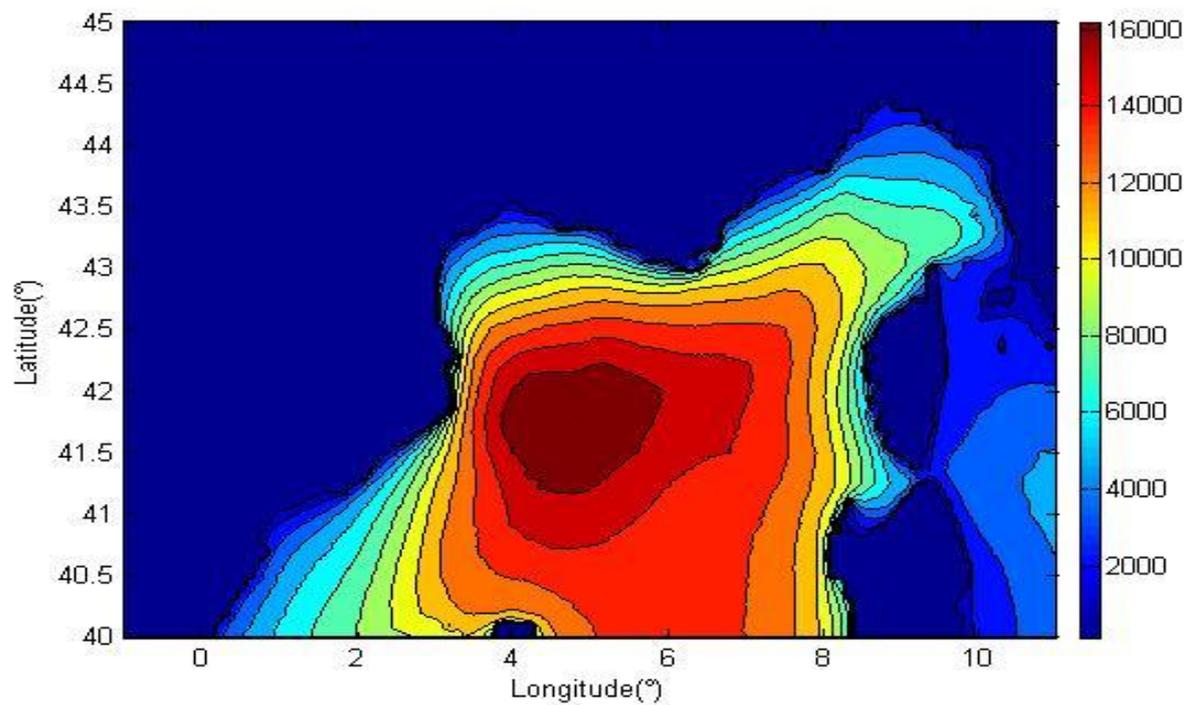


Fig. 45 - Potenza media media(W/m) del mese di MARZO 2010

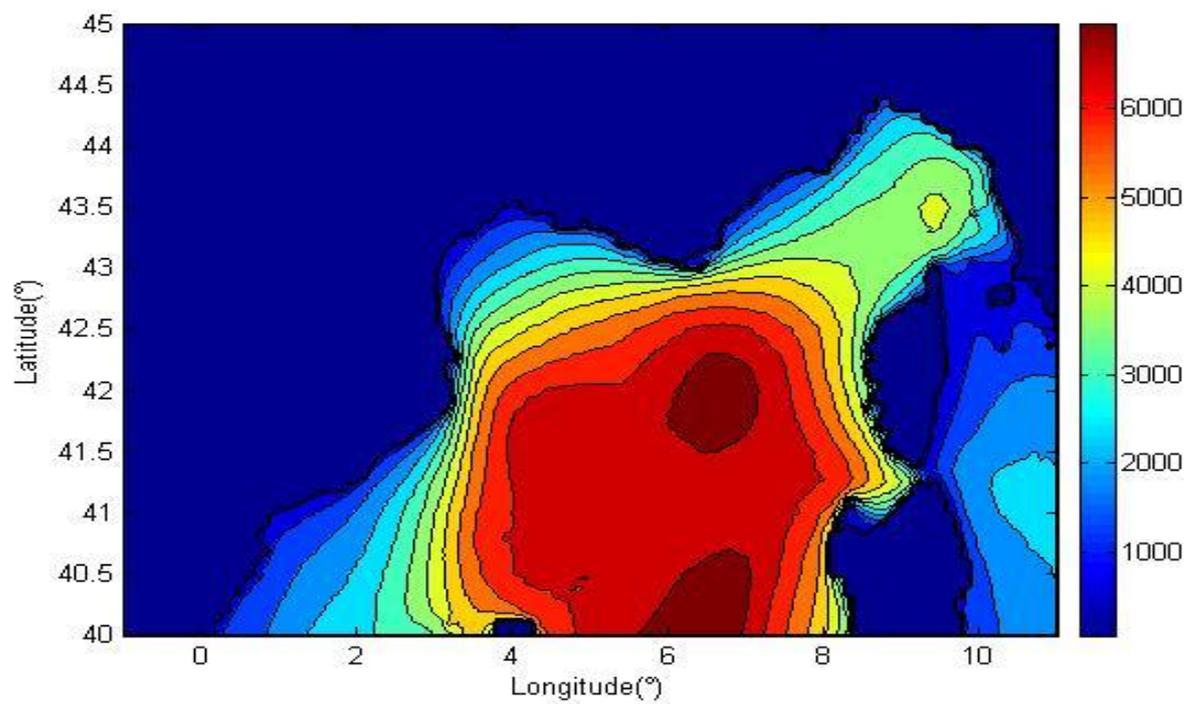


Fig. 46 - Potenza media(W/m) del mese di APRILE 2010

**Appendice B** – Grafici delle potenze medie mensili, dettaglio dell'Alto Tirreno e Mar Ligure

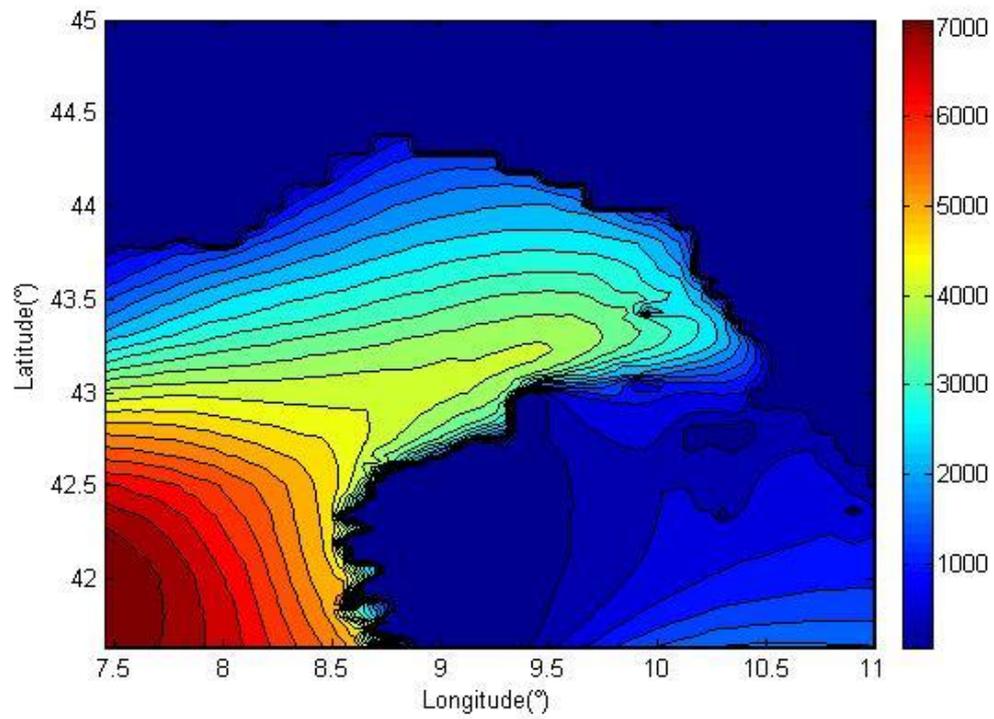


Fig. 47 - Potenza media(W/m) del mese di LUGLIO 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

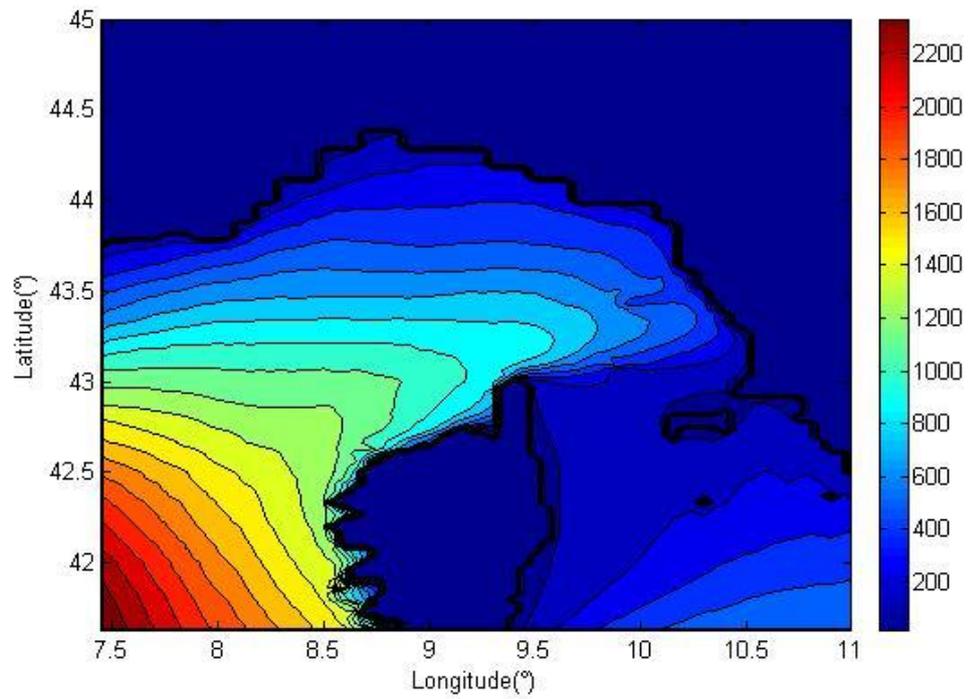


Fig. 48 - Potenza media(W/m) del mese di AGOSTO 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

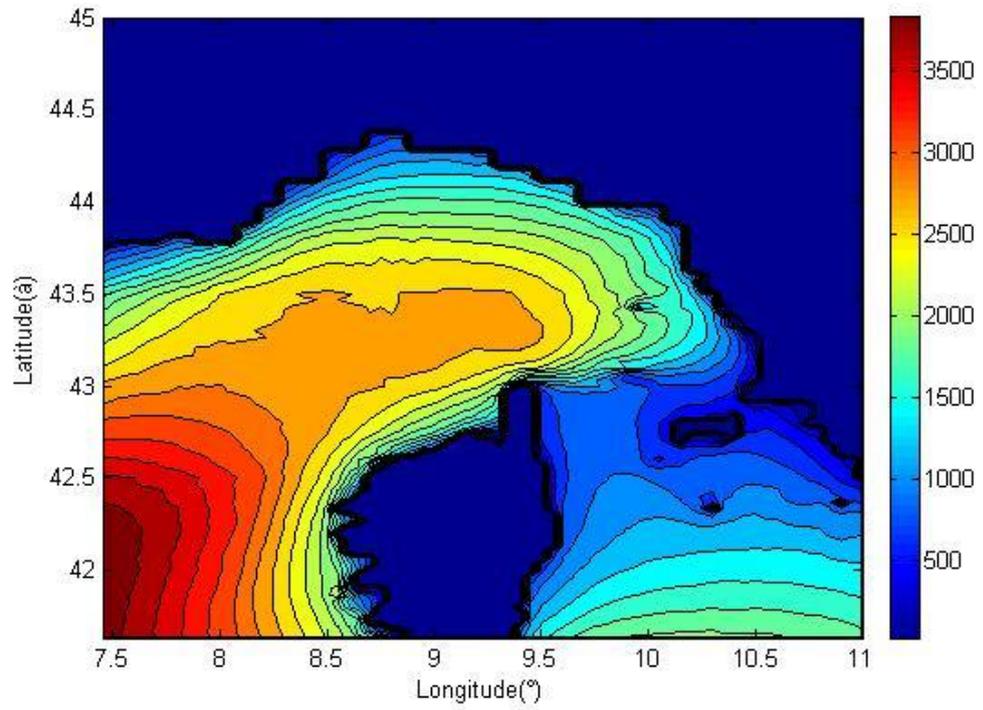


Fig. 49 - Potenza media(W/m) del mese di SETTEMBRE 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

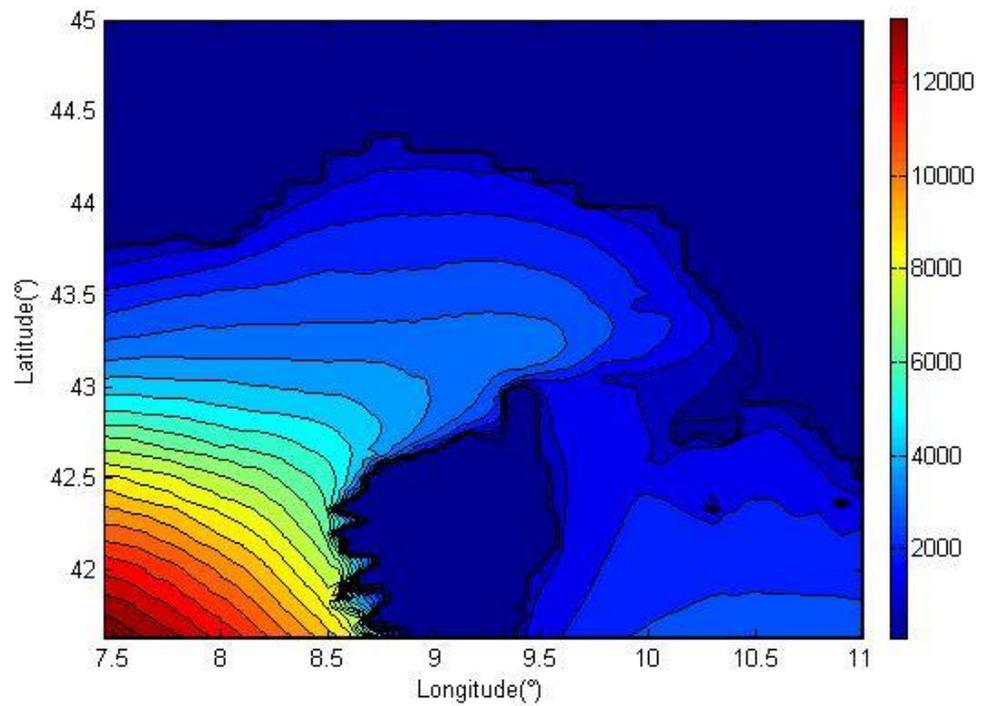


Fig. 50 – Potenza media(W/m) del mese di OTTOBRE 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

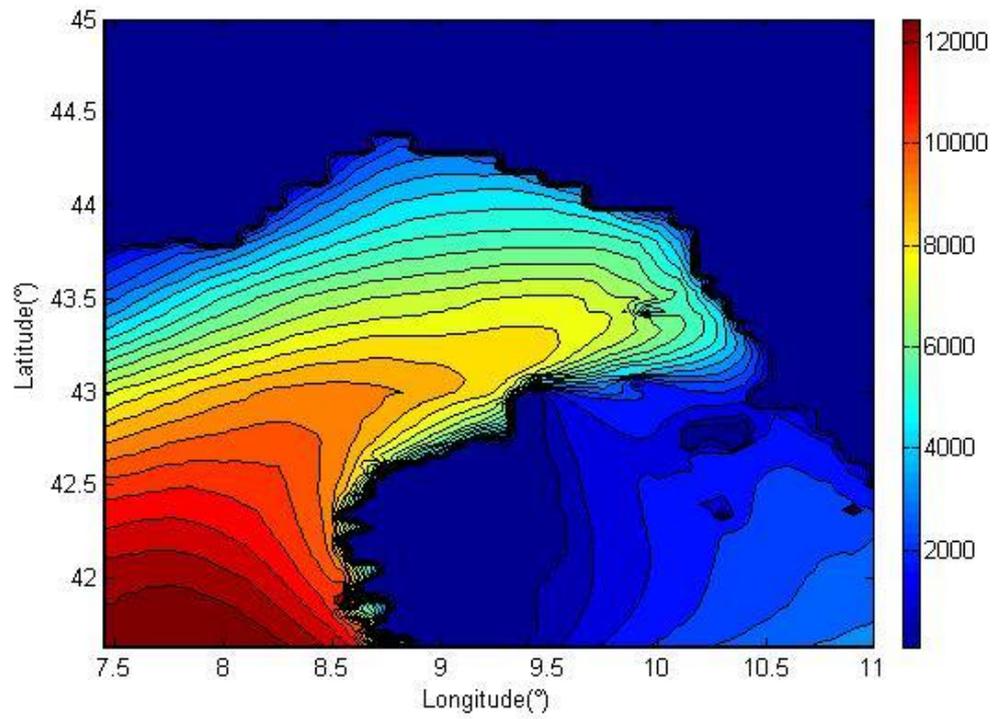


Fig. 51 - Potenza media(W/m) del mese di NOVEMBRE 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

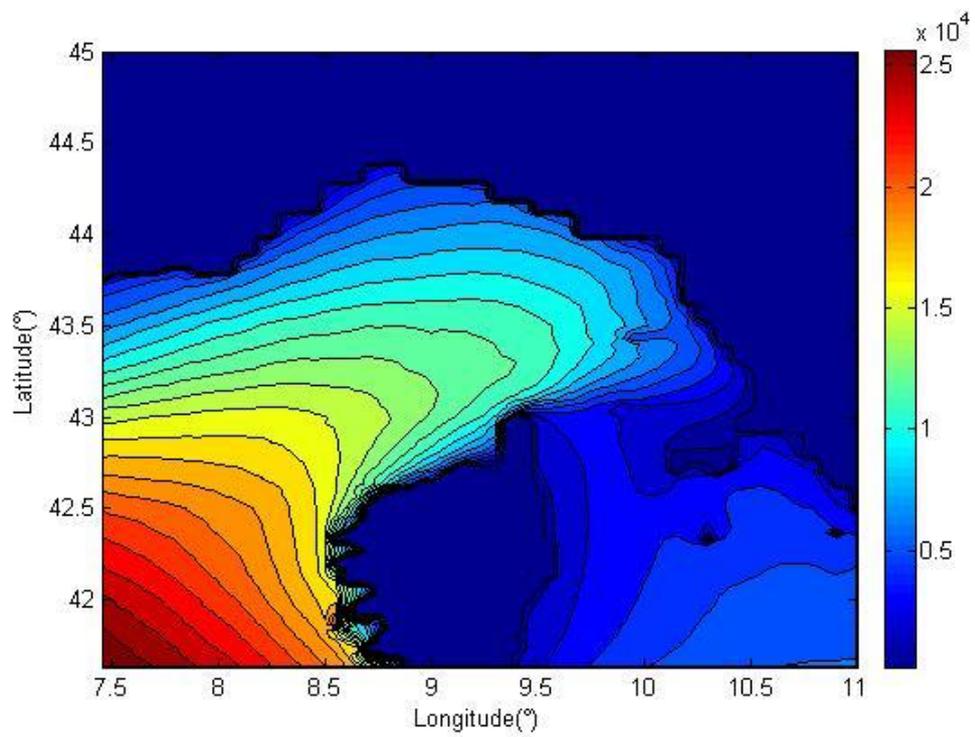


Fig. 52 - Potenza media(W/m) del mese di DICEMBRE 2009 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

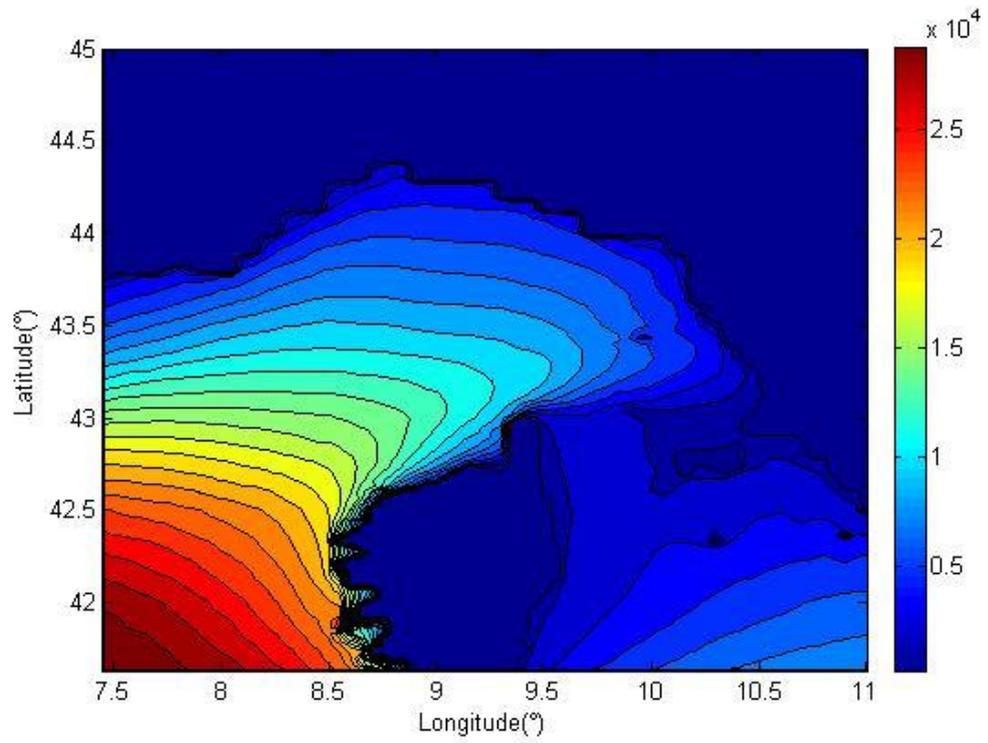


Fig. 53 - Potenza media(W/m) del mese di GENNAIO 2010 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

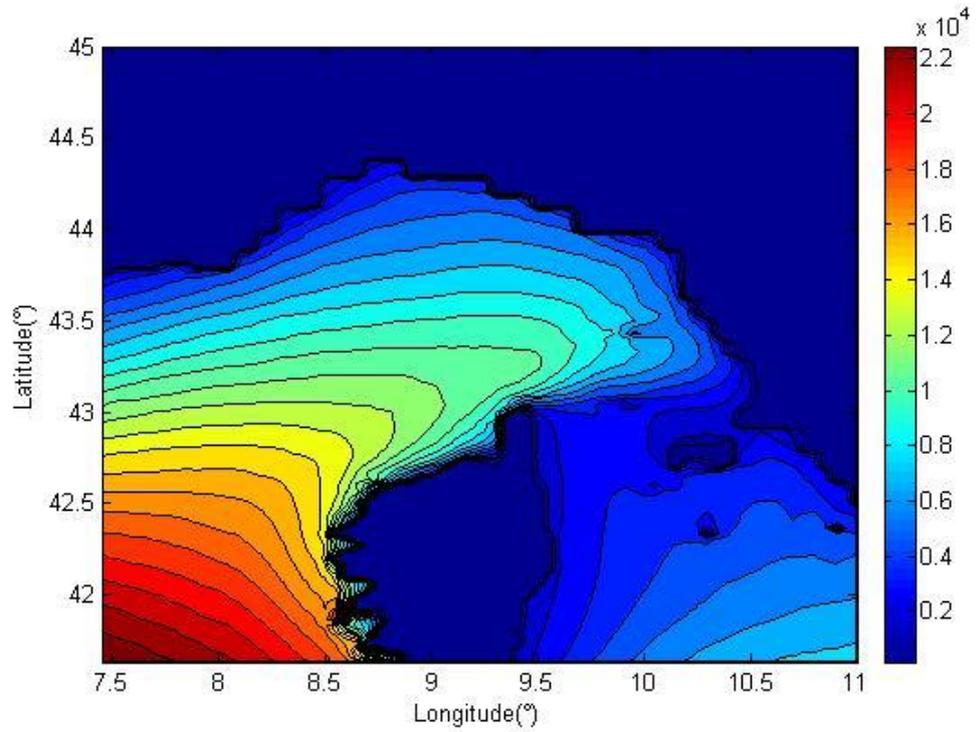


Fig. 54 - Potenza media(W/m) del mese di FEBBRAIO 2010 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

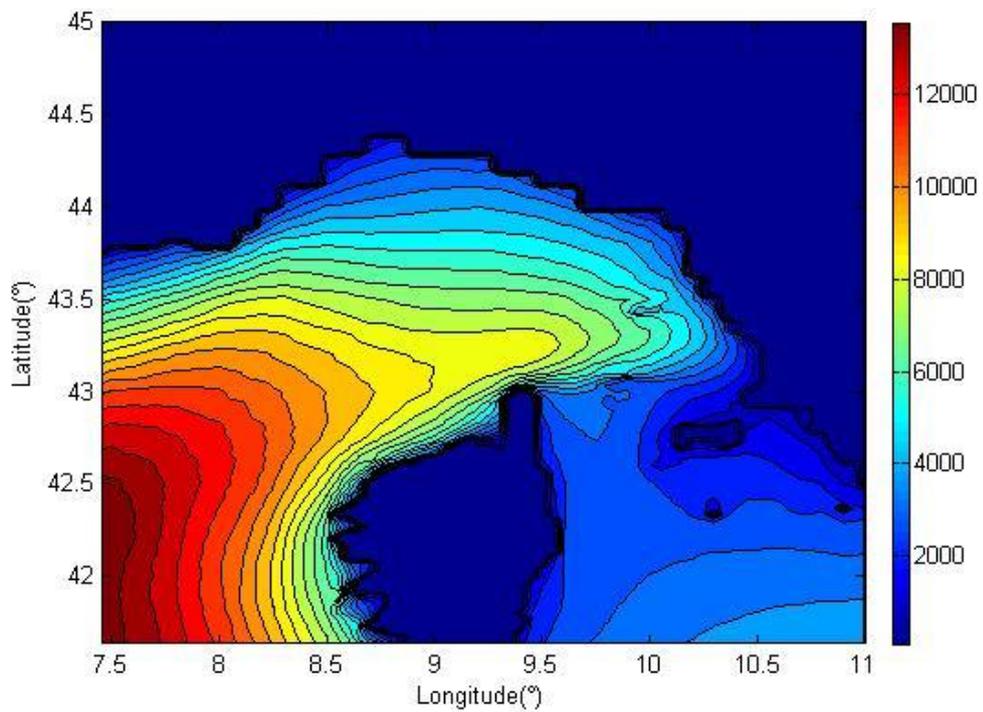


Fig. 55 - Potenza media(W/m) del mese di MARZO 2010 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

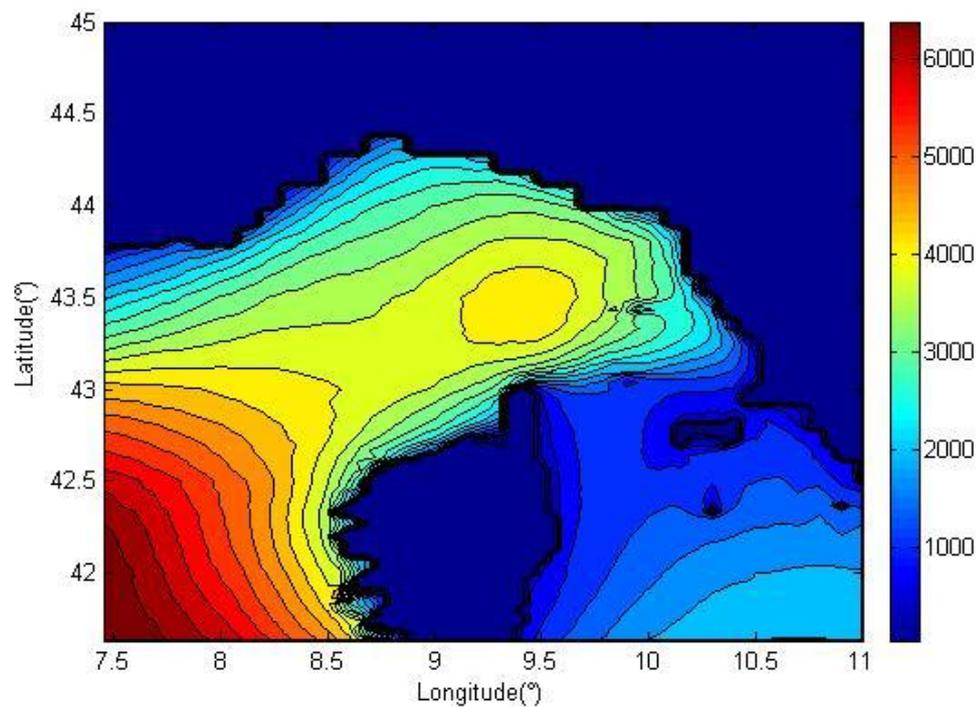


Fig. 56 - Potenza media(W/m) del mese di APRILE 2010 dettaglio Alto Tirreno e Mar Ligure

**Appendice C** – Grafici dell'andamento delle potenze medie giornaliere dei dieci siti dal 2 luglio 2009 al 17 aprile 2010

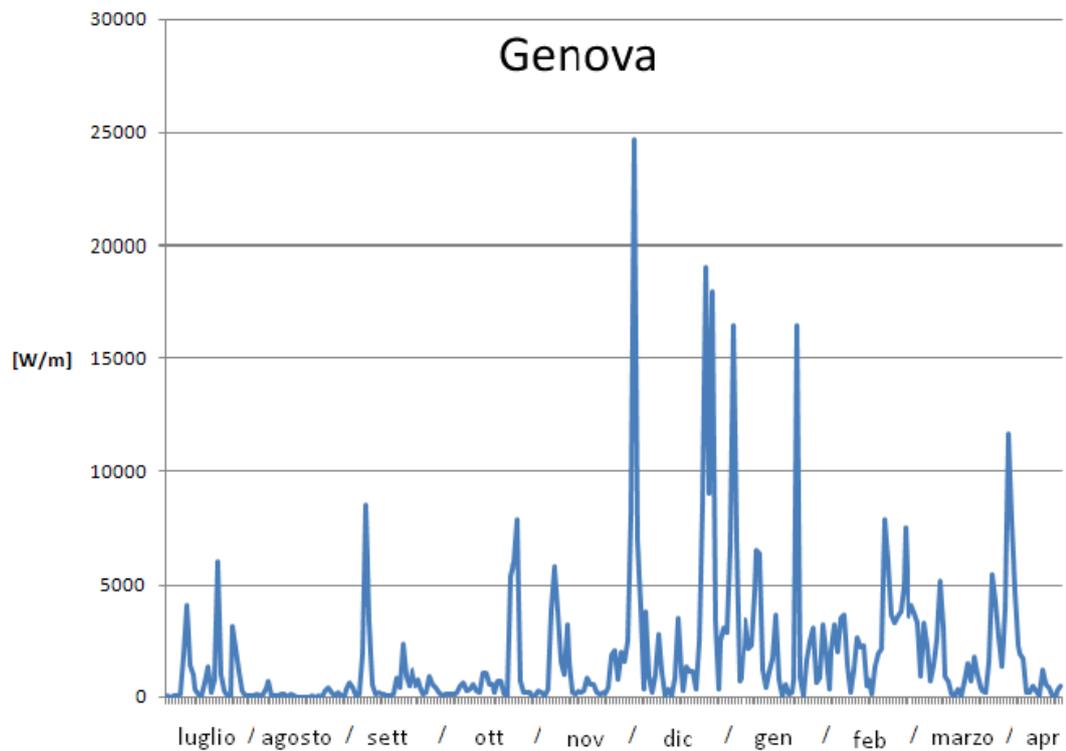


Fig. 57 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Genova

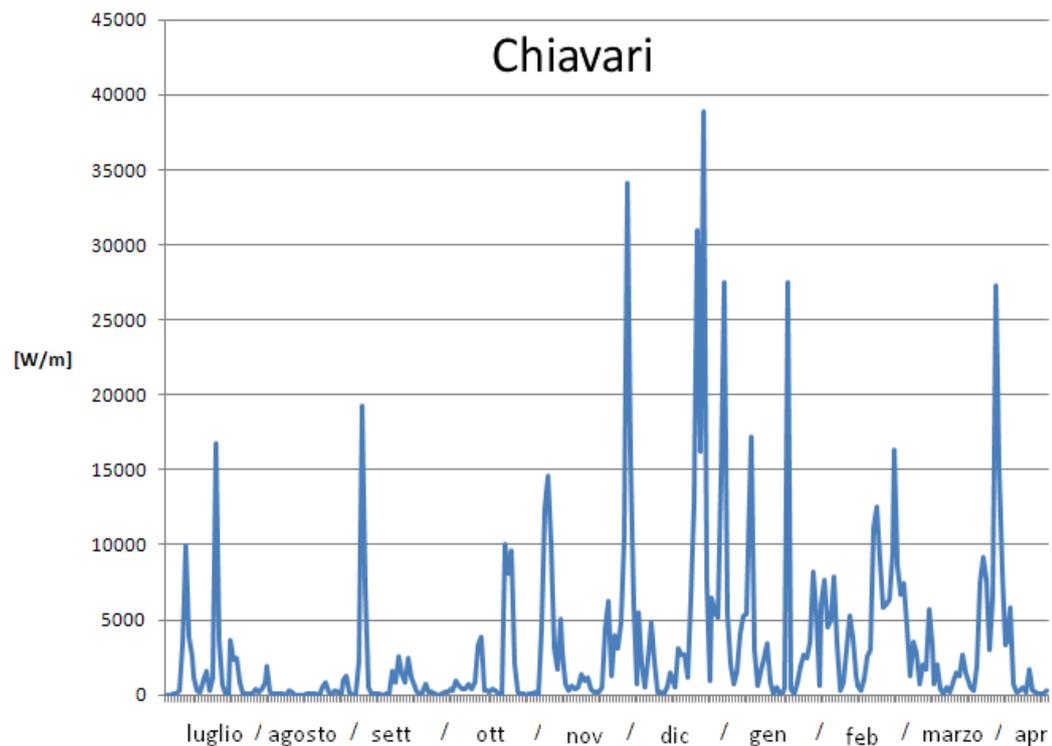


Fig. 58 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Chiavari

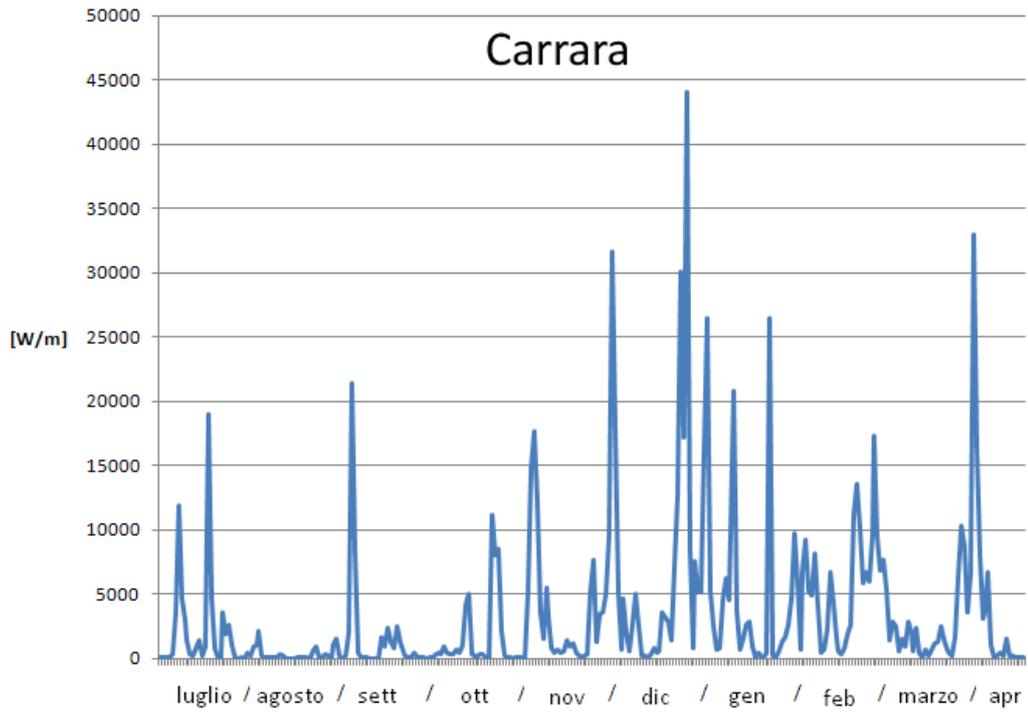


Fig. 59 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Carrara

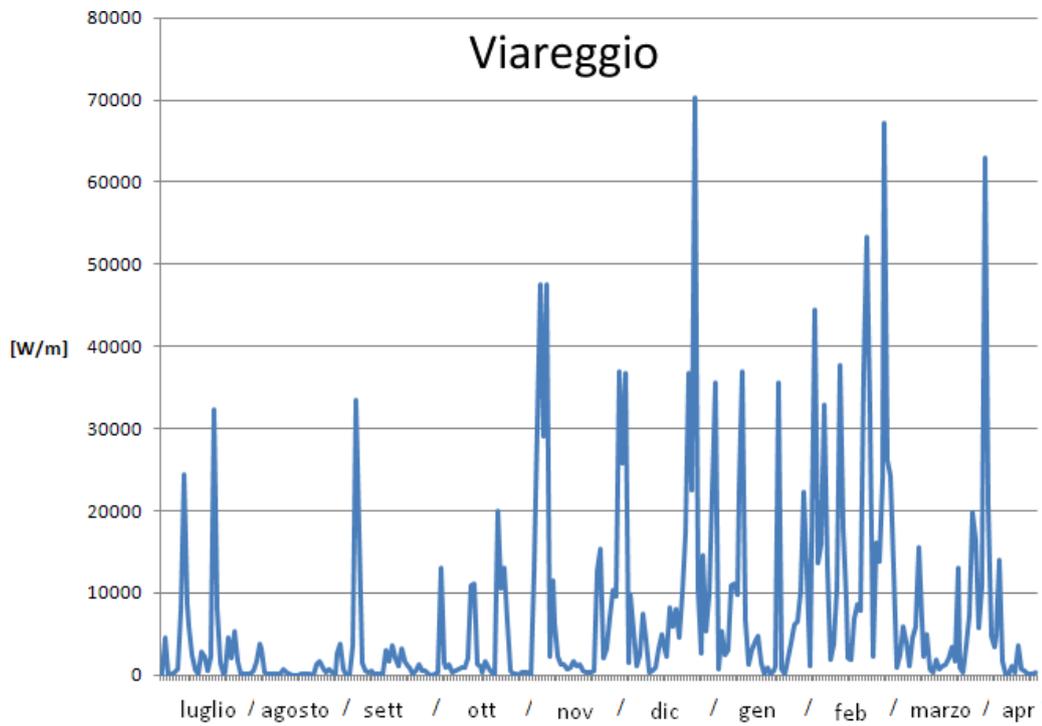


Fig. 60 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Viareggio

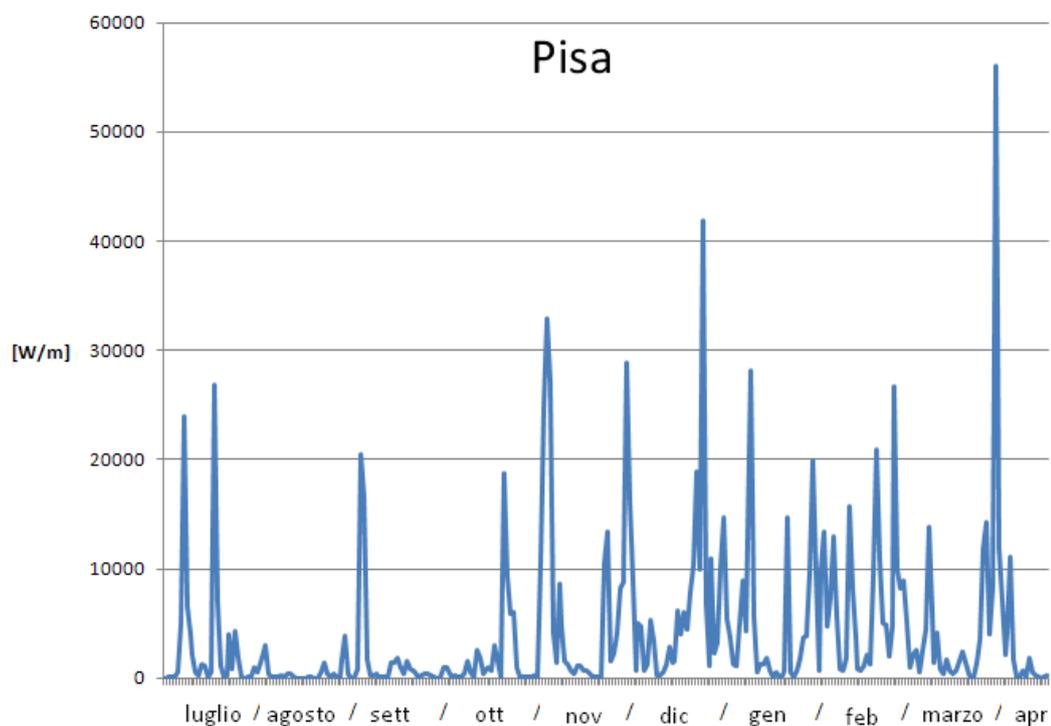


Fig. 61 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Pisa

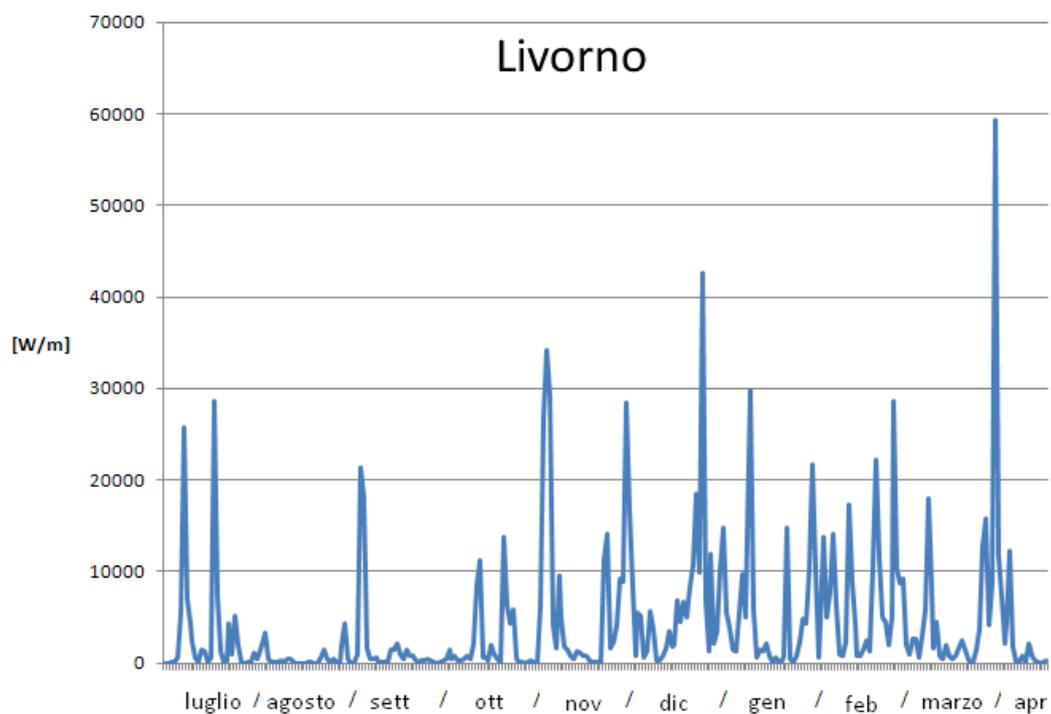


Fig. 62 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Livorno

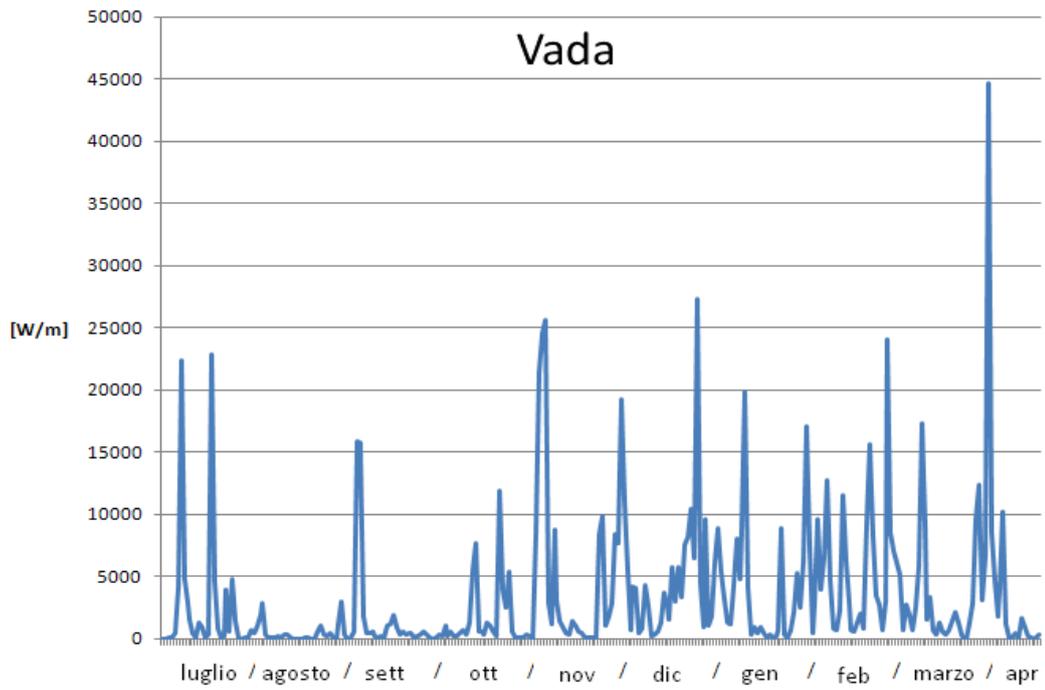


Fig. 63 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Vada

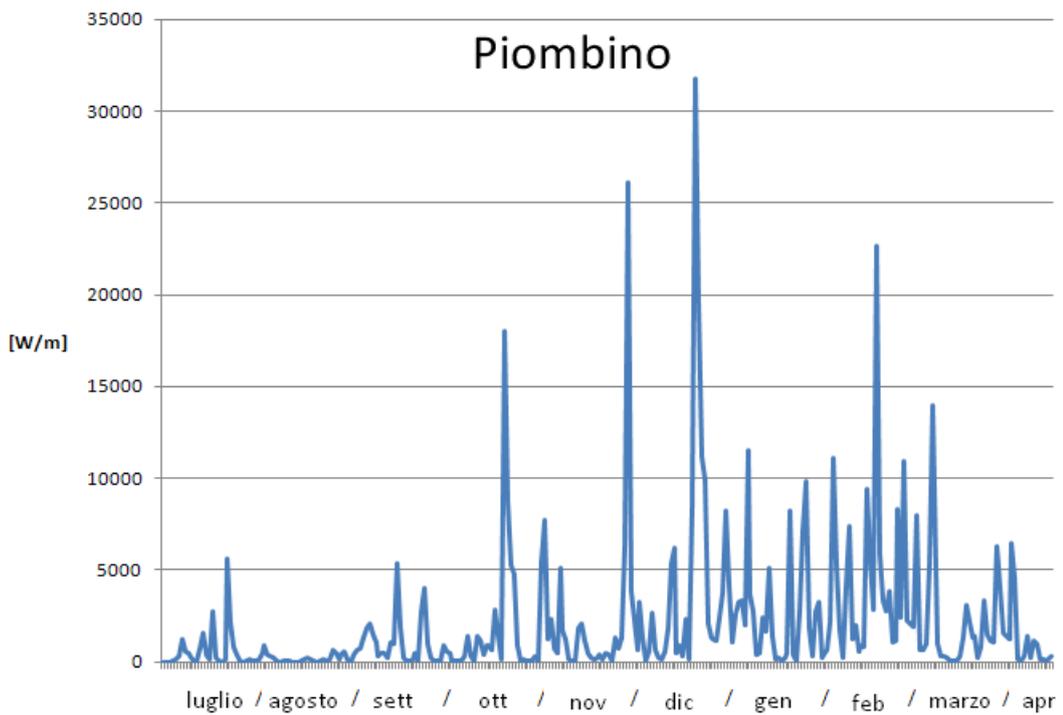


Fig. 64 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Piombino

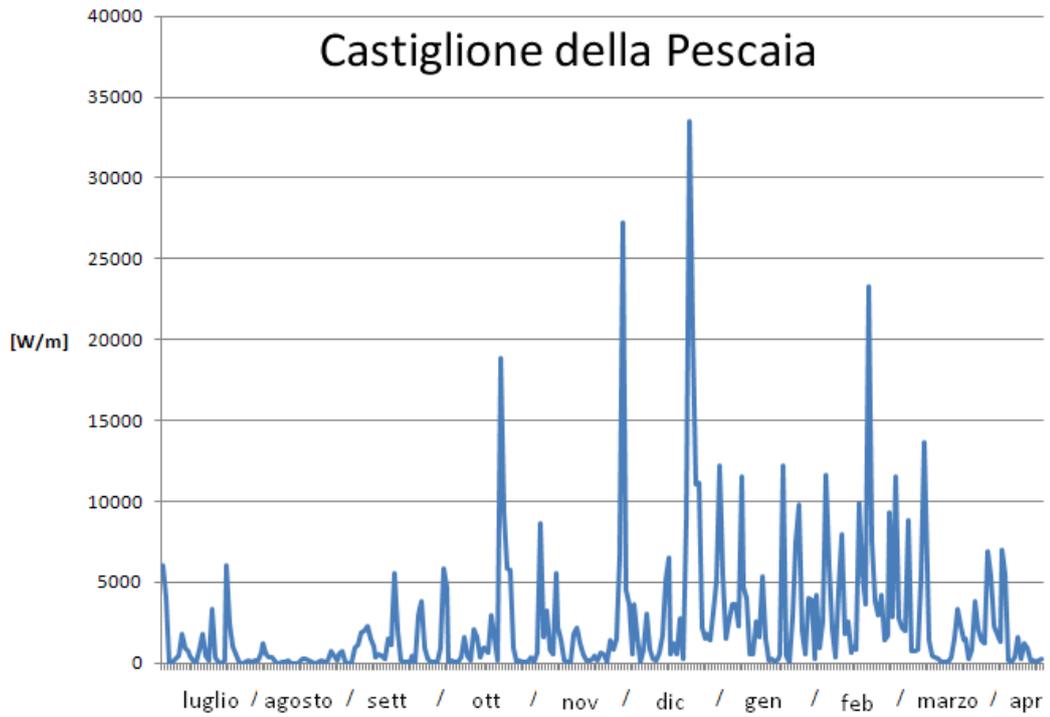


Fig. 65 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Castiglione della Pescaia

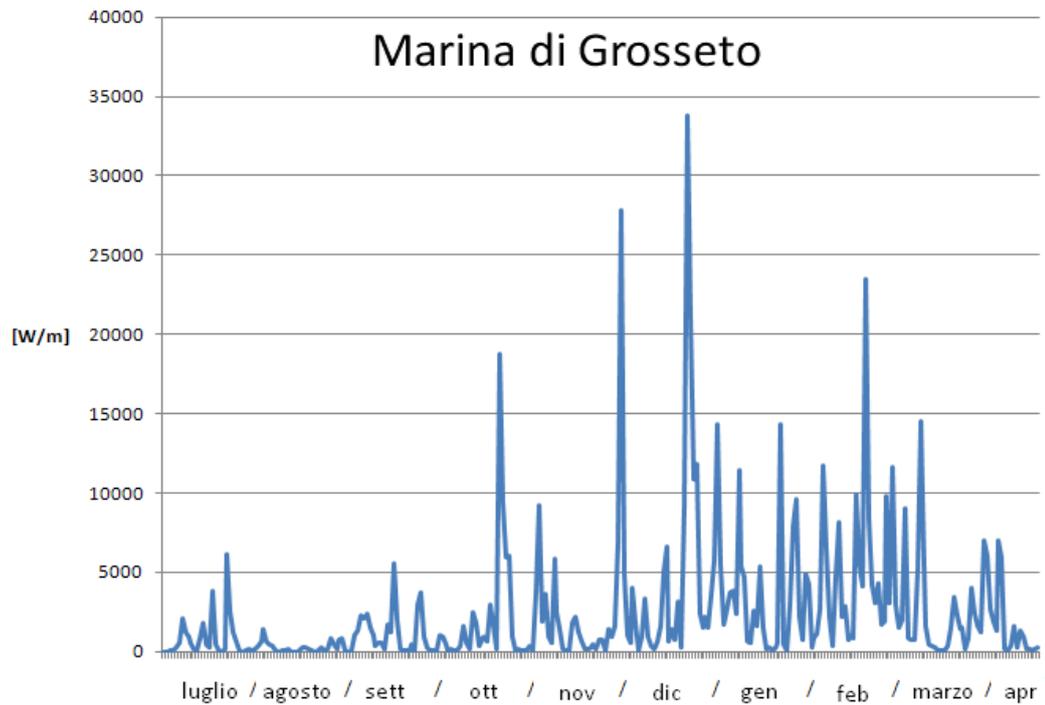


Fig. 66 - Andamento delle potenze medie giornaliere del sito di Marina di Grosseto

## Bibliografia

[ 1] Leo H.HOLTHUIJSEN, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, New York, Cambridge University Press, 2007, pp24-47 /324-334.

[ 2] Robert G.DEAN, Robert A.DARLYMPLE, *Water wave mechanics for engineers and scientists*, Singapore, World Scientific Publishing, 2000, pp94-100 .

*Tesi consultate:*

[ 3] Roberto DI LAURO, *Sviluppo di Componenti Grid per la Condivisione di Strumenti di Acquisizione Dati*, Tesi di laurea in Ingegneria Informatica, Università Parthenope Napoli, relatore Prof. Raffaele Montella, a. a. 2007-2008, p. 19-20.

*Riviste consultate:*

[ 4 ] Fred PEARCE, *Ma cosa vogliono questi ambientalisti*, "Modus vivendi", giugno 2009, p. 47-51

## Sitografia

[ 5] Fri-el Green Power, *Fri-el Sea Power*, <<http://frielacerra.it/it/sea-power/il-progetto>>, ultima consultazione: 01/09/2010

[ 6] Luc Hamilton, "AWS Ocean energy Ltd", <[http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/gp/gp\\_events/ocean\\_energy/1200\\_aws-mkii\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/gp/gp_events/ocean_energy/1200_aws-mkii_en.pdf) >, 25 ottobre 2006: ultima consultazione: 25/08/2010

[ 7] Pelamis , *Pelamis wave power*, <http://www.pelamiswave.com/our-technology/pelamis-wec>, ultima consultazione: 30/08/2010

[ 8] Previmer , *Previmer Coastal observations and forecasts*, <[www.previmer.com](http://www.previmer.com)>, ultima consultazione: 01/09/2010

[ 9] Seagen , *Seagen Sea Generation Ltd*, <[www.seageneration.co.uk](http://www.seageneration.co.uk)>, ultima consultazione: 01/09/2010

[ 10] Wavegen , *Voith Hydro Wavegen*, <<http://www.wavegen.co.uk/pdf/art.1707.pdf>>, ultima consultazione: 28/08/2010