



Ricerca di Sistema elettrico

Misura del profilo di corrente marina nello Stretto di Messina ai fini della stima della produzione di energia

D. P. Coiro, G. Troise, F. Lioniello



DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
INDUSTRIALE

SEZIONE
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

MISURA DEL PROFILO DI CORRENTE MARINA NELLO STRETTO DI MESSINA AI FINI DELLA STIMA DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA

D. P. Coiro (Università degli Studi Napoli "Federico II")
F. Lioniello, G. Troise, "EolPower Group s.r.l."

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazione sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Obiettivo: B3 Ottimizzazione di dispositivi U-OWC in funzione dello stato del mare

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Misura del profilo di corrente marina nello Stretto di Messina ai fini della stima della produzione di energia" tra ENEA e l'Università degli Studi Napoli "Federico II", Dipartimento Ingegneria Industriale.

Responsabile scientifico ENEA: Dr. Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Università degli Studi di Napoli "Federico II": Prof. Domenico Coiro

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Università degli Studi Napoli "Federico II": Domenico Coiro

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 LOCALIZZAZIONE DEL PUNTO DI MISURA DELLA CORRENTE	5
3 STRUMENTAZIONE DI MISURA UTILIZZATA	6
3.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	6
3.2 CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI MISURA	7
3.2.1 <i>Caratteristiche generali</i>	7
3.2.2 <i>Ricostruzione del profilo di velocità</i>	8
3.3 ACCURATEZZA	10
3.4 INSTALLAZIONE	10
4 CARATTERISTICHE DELLE MISURAZIONI E ANALISI DEI DATI	15
4.1 TIPOLOGIA DEI DATI RILEVATI	15
4.2 TEMPI DI MISURAZIONE	15
4.3 ESEMPI DI LETTURA DATI	15
4.4 METODOLOGIA DI ANALISI	17
4.4.1 <i>Analisi qualitativa delle storie temporali</i>	17
4.4.2 <i>Stime sperimentali di probabilità della velocità</i>	20
4.4.3 <i>Caratterizzazione statistica della distribuzione di velocità</i>	22
5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	24

Sommario

Il presente documento è inteso a fornire informazioni su sistemi di misurazione della velocità delle correnti marine e sul possibile uso dei dati rilevati. I profilometri sonici presentano alcune utili caratteristiche che li rendono interessanti per ricerche sulle correnti marine in siti relativamente prossimi alle coste. Tali strumenti consentono di rilevare i profili di velocità in funzione della profondità.

Possibili impieghi delle analisi delle informazioni correntometriche possono essere trovati nella valutazione della sfruttabilità energetica di particolari siti e nella valutazione di idoneità all'installazione di eventuali impianti di conversione dell'energia cinetica delle correnti. Inoltre la conoscenza dei profili di velocità in particolari siti può fornire supporto ad altre aree di ricerca; ad esempio, fornendo dati per la validazione di modelli numerici per lo studio delle correnti.

1 Introduzione

Scopo del presente documento è lo studio di dati sperimentali relativi alle correnti marine, ottenuti mediante misurazioni effettuate in uno specifico sito mediante l'impiego di un correntometro. Tale indagine risulta particolarmente necessaria per due motivi principali:

1. Permette di poter stimare quanta energia di corrente marina è possibile estrarre nel sito investigato
2. Permette di validare i modelli numerici di predizione delle correnti marine, come quello messo a punto dall' ENEA, al fine di essere in grado di predire l'energia producibile in qualsiasi altro punto dello Stretto di Messina

Il sito di rilievo scelto è posizionato appunto nello Stretto di Messina che è l'unico sito in Italia dove la corrente ha un'intensità tale da permettere una significativa produzione di energia da correnti marine o di marea. Lo strumento di misura è un correntometro sonico, posizionato sul fondo marino, con la capacità di misurare la direzione della corrente ed il profilo di velocità in 3 componenti in funzione della profondità lungo una colonna d'acqua che parte dal sensore e termina in superficie.

2 Localizzazione del punto di misura della corrente

La campagna di misure ha luogo nello stretto di Messina, sito estremamente favorevole allo sviluppo delle tecnologie di sfruttamento delle risorse energetiche da correnti marine, per i livelli abbastanza elevati delle correnti, accompagnati da situazioni meteorologiche favorevoli in buona parte dell'anno.

Il punto di installazione è situato in prossimità di Punta Pezzo

Tale sito, come noto da indagini effettuate in precedenza (PAR2011,RdS/2011/65), presenta un buon livello di velocità massima che ovviamente cambia durante il corso dell'anno.



3 Strumentazione di misura utilizzata

Lo strumento utilizzato per le rilevazioni è un profilometro sonico (ADCP) di denominazione commerciale Sontek Argonaut XR.

L'Argonaut appartiene ad una classe di strumenti nota come correntometri doppler monostatici. Il termine monostatici si riferisce al fatto che lo stesso trasduttore funziona sia come trasmettitore che come ricevitore. Un rilevatore Doppler monostatico usa un set di trasduttori acustici di cui è noto esattamente il posizionamento e l'orientazione, ciascuno dei quali produce uno stretto fascio di onde sonore emesse normalmente alla superficie del trasduttore.

3.1 Principio di funzionamento

Durante il funzionamento ciascun trasduttore produce un breve impulso sonoro di frequenza nota, che si propaga lungo l'asse di emissione del trasduttore. Il suono emesso viene riflesso in tutte le direzioni dal particolato naturalmente presente in sospensione nel fluido in cui si effettua la misurazione. Una frazione della energia emessa viene riflessa verso la stessa sorgente con uno *shift* in frequenza, classico dell'effetto Doppler, proporzionale alla velocità della particella che ha riflesso l'onda sonora incidente.

La teoria dell'effetto Doppler infatti prevede che se una sorgente sonora è in moto rispetto ad un ricevitore, quest'ultimo osserva una frequenza diversa dalla frequenza di emissione secondo la relazione:

$$F_d = F_s \frac{V}{C}$$

dove F_d è lo spostamento in frequenza (effetto Doppler), F_s è la frequenza dell'onda sonora, V è la velocità della sorgente relativa al ricevitore (una velocità positiva indica un incremento della distanza tra sorgente e ricevitore) e C è la velocità del suono.

Attraverso la misura della variazione di frequenza dovuta all'effetto Doppler, il sistema è in grado di stimare la componente di velocità lungo ciascuno degli assi dei fasci emessi dai trasduttori. Utilizzando tre fasci sonori e conoscendo l'orientazione relativa dei fasci è possibile ricostruire la velocità tridimensionale del flusso medio. Lo strumento può anche essere fornito di bussola in modo da fornire le componenti di velocità in un sistema East-North-Up (ENU).

Alcuni significativi vantaggi della tecnologia di misura della velocità basata sull'effetto Doppler sono di seguito riportati:

- La misura è effettuata in un punto remoto dal sistema di misura; in tal modo la distorsione della misura indotta dalla presenza dello strumento è ridotta;
- è possibile effettuare misure anche a velocità molto basse;
- non sono presenti parti in movimento, come su altre tipologie di sensori (come ad esempio eliche mosse); in tal modo si riduce la sensibilità alle incrostazioni o alla formazione di colonie biologiche, e si migliora la possibilità di intervenire con applicazione di antivegetativi (circostante particolarmente interessanti per lunghe installazioni in ambiente marino);
- i sistemi basati sul principio Doppler presentano una ridotta necessità di ricalibrazioni, essendo i dati di velocità, misurati secondo tale principio, difficilmente affetti da derive.

3.2 Caratteristiche del sistema di misura

3.2.1 Caratteristiche generali

Le principali caratteristiche geometriche del sistema di misura sono di seguito riportate:

Diametro: 15.2 cm

Altezza: 18 cm

Peso in aria: 2.5 kg (peso in acqua: -0.3 kg)

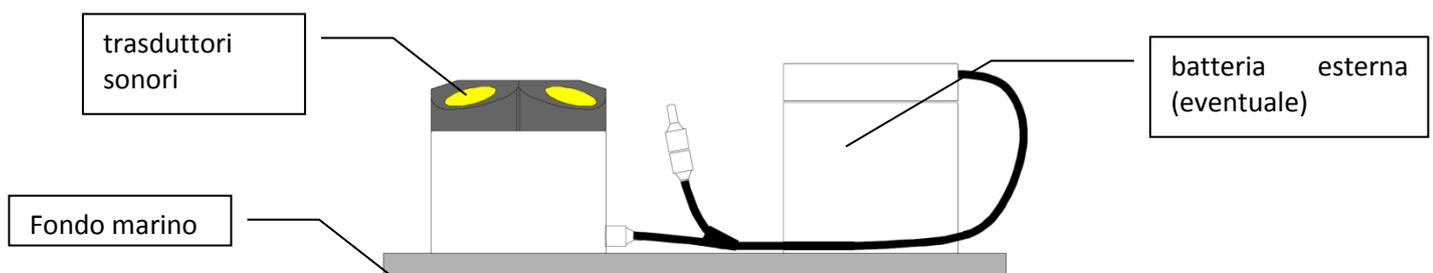


Figura 1. Schema di installazione dell'ADCP SonTekArgonaut XR (montaggio sul fondale, up-looking).



Figura 2. Sensore ADCP SontekArgonaut-XR.

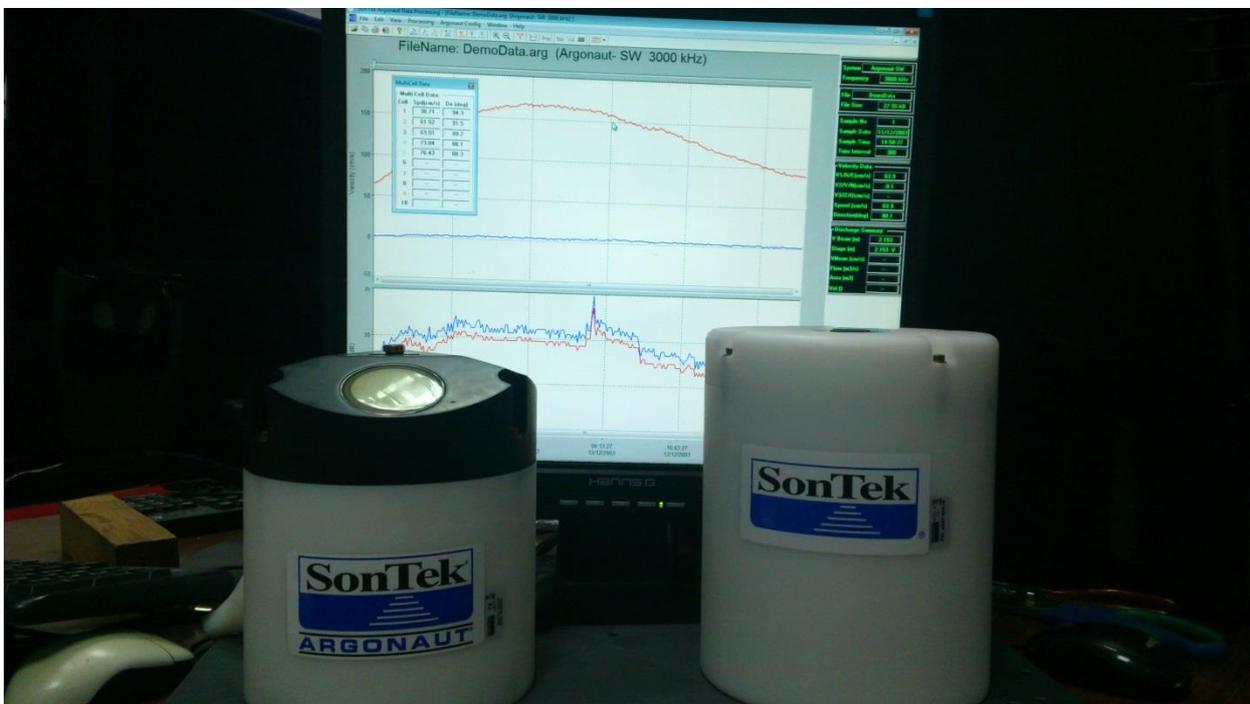


Figura 3. Sistema acquistato Argonaut-XR con batteria e software di gestione e controllo.

Il sistema è generalmente montato sul fondo in configurazione *up-looking*, anche se è possibile un secondo tipo di installazione (meno frequente), con montaggio su una boa in superficie in modalità *down-looking*. Le misure sono effettuate in un volume conico con semiapertura di 25°. Il diametro del cono ad una data distanza dal sistema di misura è pari a 0.93 volte la distanza dal sistema. L'estensione verticale del volume di misura è definibile dall'utente.

Il sistema riporta la velocità in celle di misura di altezza variabile, in funzione del *range* di osservazione impostato dall'utente, con un massimo numero di celle pari a 10. Il range di profondità massimo in cui il sistema è in grado di operare è di circa 40 m.

3.2.2 Ricostruzione del profilo di velocità

Il sistema di misura preso in esame possiede l'interessante caratteristica di poter ricostruire il profilo di velocità in funzione della profondità. In relazione alla misura della velocità il sistema possiede due modalità di misura, utilizzabili in maniera combinata per la definizione del volume di controllo utilizzato per la stima di velocità.

Nella prima modalità, il sistema possiede la possibilità di definire un volume di controllo unico, con estremità inferiore e superiore assegnate dall'utente. Il volume di controllo può essere infatti definito tramite l'indicazione diretta da parte dell'utente delle distanze iniziale (*cellbegin*) e finale dal sensore (*cell end*). Nella stessa modalità è, inoltre, possibile utilizzare un'opzione di aggiustamento automatico delle dimensioni della cella di misura unica. Il sistema possiede un sensore di pressione interno, mediante il quale è in grado di determinare le variazioni di altezza della colonna d'acqua che grava su di esso. Utilizzando tale modalità di aggiustamento automatico, la posizione dell'estremità superiore della cella di controllo viene variata autonomamente dal sistema in modo da coincidere approssimativamente con la superficie libera dell'acqua. L'aggiustamento è operato utilizzando la seguente formula

$$CE = 0.9*(P - 2*\sigma_P)$$

dove CE (*cell end*) è la posizione dell'estremità superiore della cella di misura, P è il livello della superficie del mare calcolato in base alla misura di pressione, σ_P è la fluttuazione del livello del mare, stimata attraverso il sensore di pressione (?). La formula cerca di tenere conto della fluttuazione del livello del mare dovuta al moto ondoso ed applica una ulteriore riduzione del 10% per mantenere il livello superiore della cella di misura sempre all'interno del fluido. La posizione dell'estremità inferiore della cella varia anch'essa, al variare del livello del mare.

La seconda modalità di misura permette la ricostruzione effettiva del profilo di velocità. Il sistema funziona come un usuale profilometro. L'utente deve definire una distanza iniziale dal sensore (*blankingdistance*), il numero di celle e la dimensione delle celle. Dopo l'assegnazione di tali valori e l'avvio della acquisizione, la posizione e l'estensione delle celle rimane costante, con il rischio che, per grandi fluttuazioni del livello del mare, parte del sistema di celle di misura possa superare il livello dell'acqua, con perdita o contaminazione dei dati.

Il numero massimo di celle è pari a 10. I valori limite dei parametri per la definizione dell'insieme di celle di misura sono tra l'altro funzione della frequenza di acquisizione.

Le due modalità possono essere utilizzate in combinazione (cosiddetta modalità *multicell*), consentendo sia la ricostruzione del profilo di velocità alle profondità di interesse (attraverso celle classiche di tipo fisso), che la misura della velocità media in un volume di dimensione desiderata, definito dalla cella dinamica, adattabile alle variazioni del livello del mare.

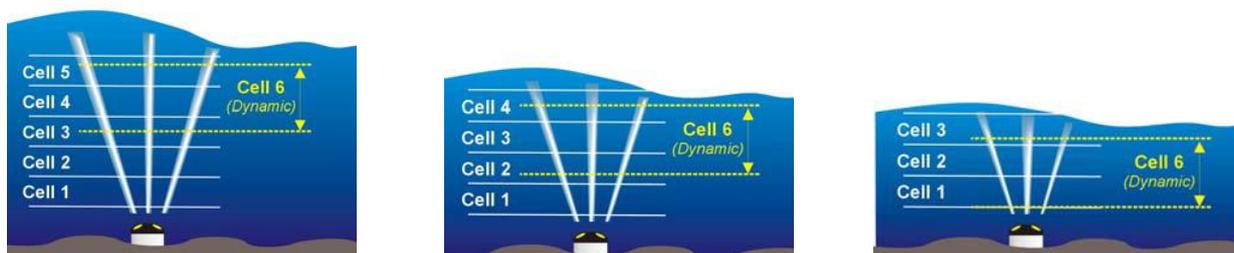


Figura 4. Esempio di utilizzo della funzione multicell, in cui sono utilizzate in maniera combinata la modalità di rilievo con celle fisse e la modalità di cella dinamica. In tale applicazione, la cella dinamica misura le velocità medie in prossimità della superficie.

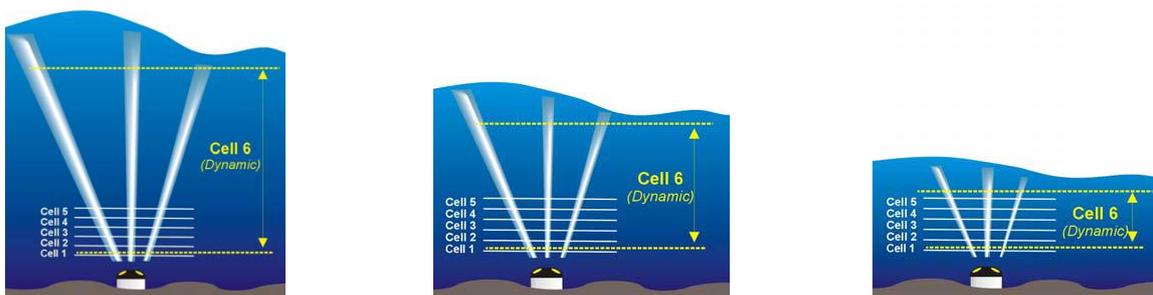


Figura 5. Esempio di utilizzo della funzione multicell, in cui sono utilizzate in maniera combinata la modalità di rilievo con celle fisse e la modalità di cella dinamica. In tale esempio, la cella dinamica misura il flusso medio nell'intera colonna d'acqua, mentre il profilo è rilevato solo in prossimità del fondale.

3.3 Accuratezza

Secondo il costruttore lo strumento è in grado di fornire misure con un'accuratezza dell'1% della misura, con un offset di 0.5 cm/s. Tali dati sono ottenuti secondo il costruttore per confronto con misure in vasca navale.

Lo stesso costruttore fornisce un'espressione per la determinazione della deviazione standard in funzione della dimensione della cella di misura e in funzione del numero di campioni considerato. L'intero volume di osservazione definito dall'utente è suddiviso in celle di misura per ricostruire il profilo di velocità a diverse profondità. La misura effettuata dallo strumento è effettuata su una cella di misura, di dimensioni specificabili dall'utente, in cui il sistema osserva le riflessioni sonore degli impulsi emessi. Inoltre, il sistema effettua una serie di misure ripetute sulla singola cella e riporta una media delle singole misure. La deviazione standard dell'insieme di misure in genere diminuisce con il crescere del numero di campioni considerati e della dimensione della cella di misura, secondo la relazione (fornita dal costruttore):

$$\sigma = \frac{20}{\sqrt{N} \sqrt{CS}}$$

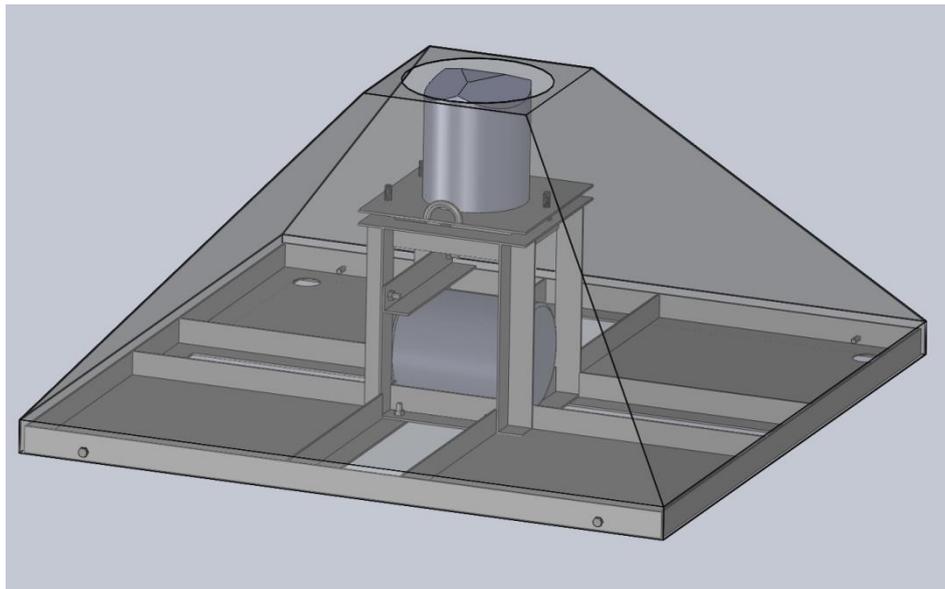
dove σ è la deviazione standard (espressa in cm/s) valutata sull'insieme delle singoli campioni di misurazione effettuati, N è il numero di campioni, CS è la dimensione (espressa in m) dell'altezza della cella di misura, specificabile dall'utente.

3.4 Installazione

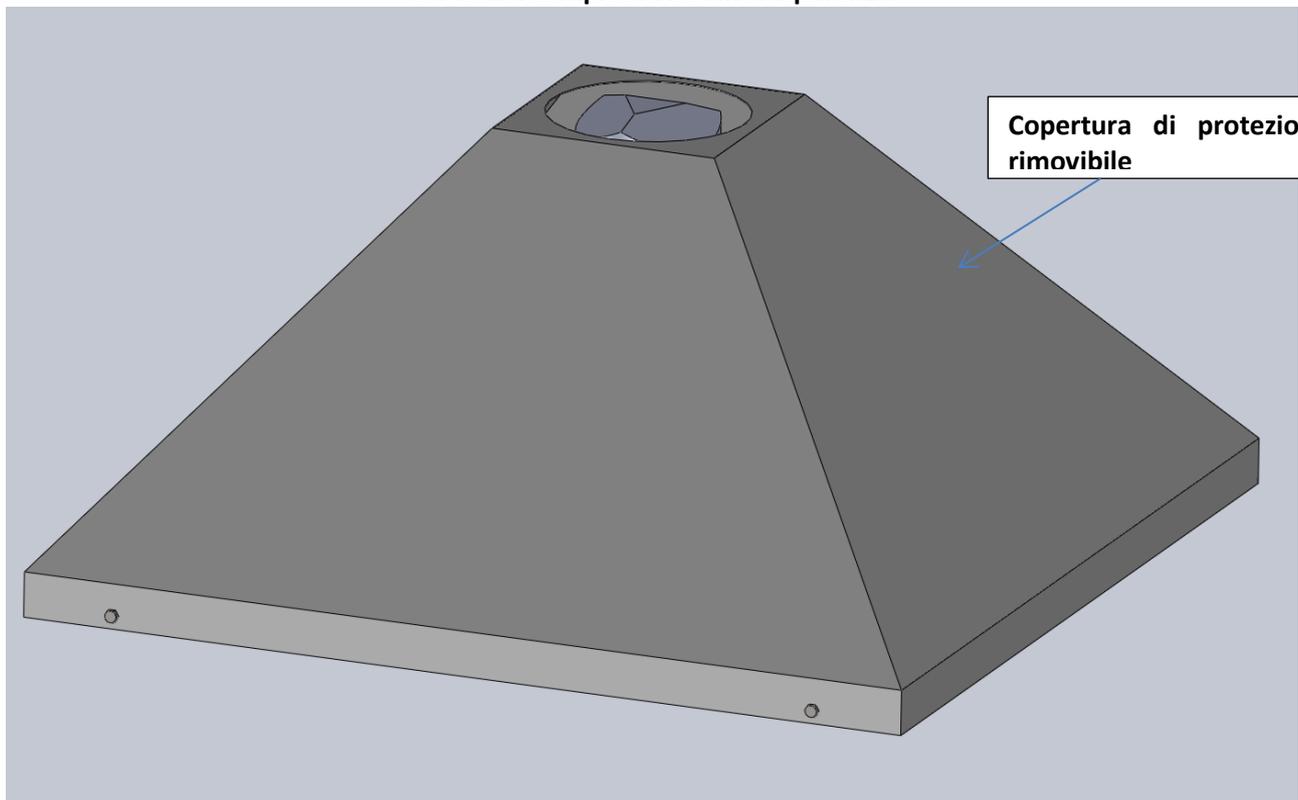
Per installare il correntometro è stato necessario progettare e costruire un'apposita struttura che avesse vari scopi:

1. Permettere l'ancoraggio al fondo marino
2. Evitare alle cime e reti di impigliarsi nella struttura stessa
3. Permettere la regolazione dello strumento in modo che esso sia posto sempre in bolla indipendentemente dal tipo di fondale
4. Permettere un facile smontaggio del solo strumento (lasciando quindi la base ancorata al fondo) quando vanno letti i dati

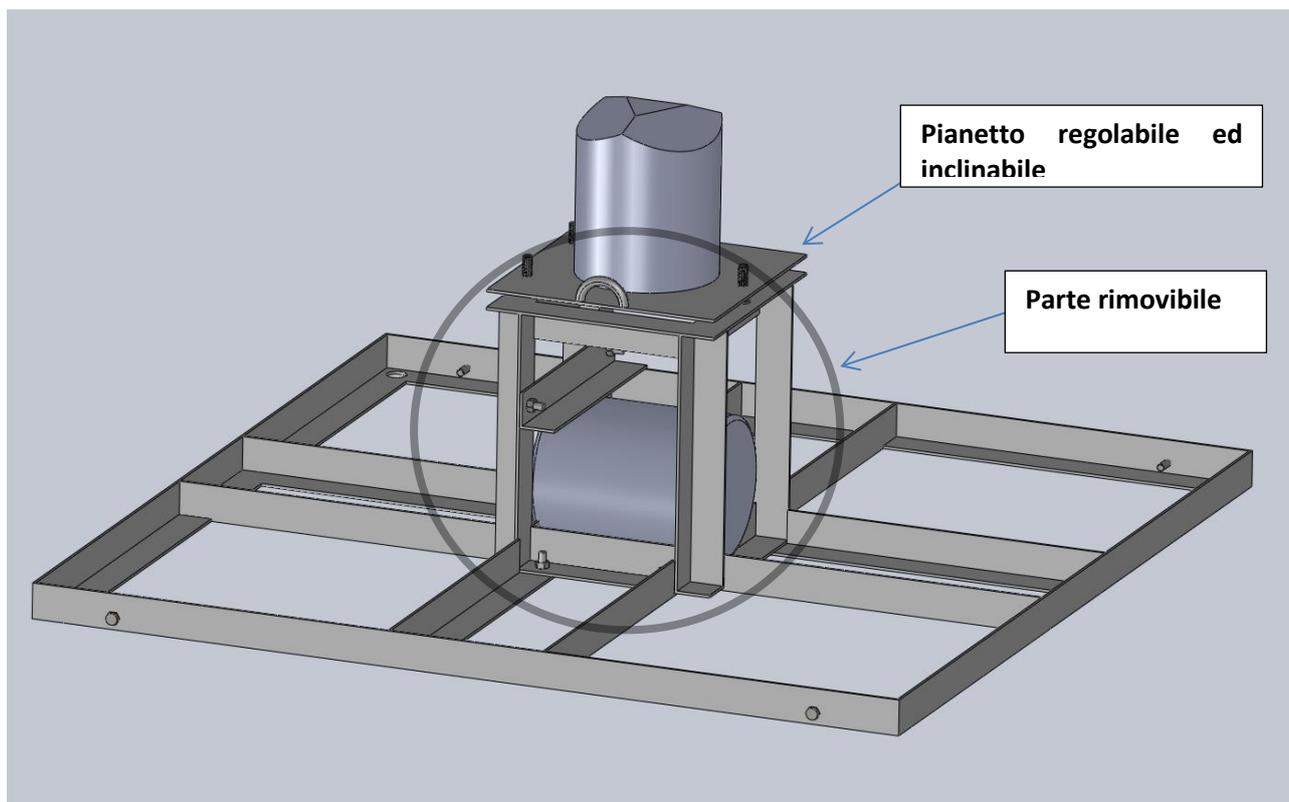
C'è stata quindi una fase di disegno CAD e di dimensionamento della struttura come riportato nelle figure seguenti:



Struttura completa vista in trasparenza



Struttura completa vista dall'esterno



Struttura interna con strumentazione

Sono stati condotti particolari studi per rendere la struttura facilmente accessibile e maneggiabile dall'esterno, visto che il sub, durante la fase di posa, deve lavorare a 40 metri di profondità con poco tempo a disposizione per la breve durata della fase di stanca della marea.

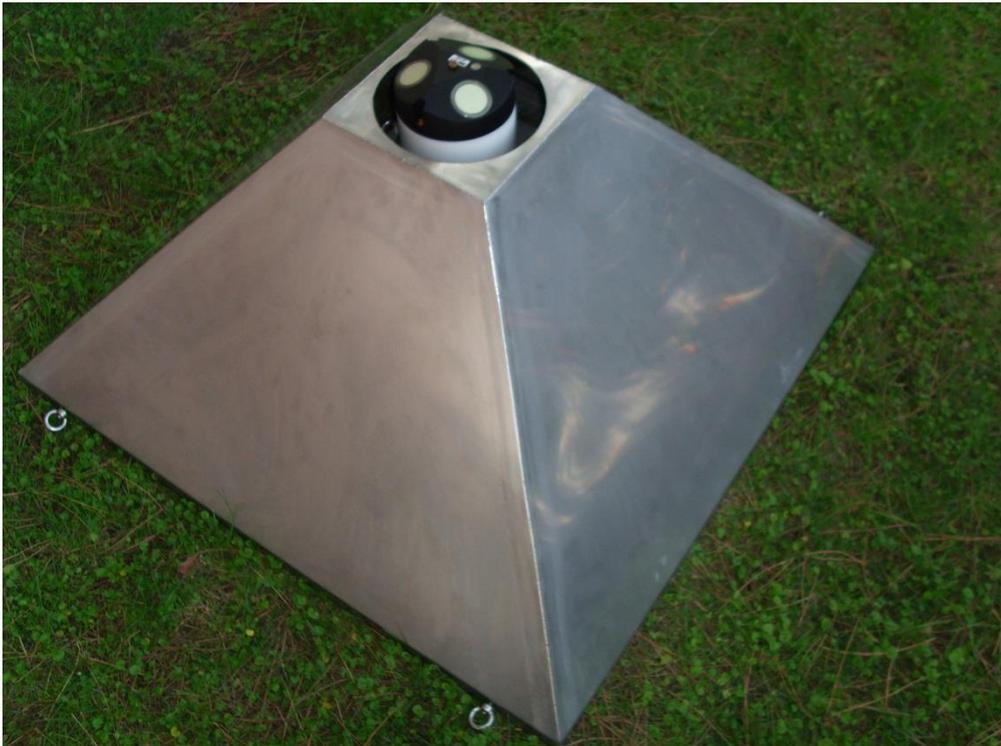
L'oggetto è stato realizzato in acciaio INOX AISI 316, ed è mostrato nelle figure seguenti pronto ad essere installato in acqua.



Struttura con Argonaut XR montato e copertura



Pianetto inclinabile



Struttura montata e pronta all'installazione

Per l'installazione è stato necessario chiedere dei permessi speciali alla Capitaneria di Porto di Reggio Calabria e si sono dovute attivare tutte le procedure di sicurezza affinché il numero di sub, la barca appoggio e tutto ciò che è necessario durante la fase di installazione, rispettasse tutti i requisiti di sicurezza imposti dalle norme.

Qui di seguito è riportata un'istantanea del tipo di fondale nel luogo di posa nei pressi di Punta



4 Caratteristiche delle misurazioni e analisi dei dati

4.1 Tipologia dei dati rilevati

Tra i sistemi di misura più ampiamente utilizzati per ottenere informazioni sperimentali sulle correnti trovano posto i correntometri sonici, che in genere consentono di rilevare tre componenti di velocità e di ricostruire un profilo di velocità in funzione della profondità. Tali sistemi di misura sono in genere basati sul principio dell'effetto Doppler.

Il sito di riferimento per i dati di esempio riportati è relativo ad una campagna di misura effettuata ad una profondità di 20 m circa. Il periodo di campionamento delle misure usate come esempio è di 25min, con un intervallo di media pari a 150 s. I dati sono rilevati ad un numero discreto di profondità; per stimare la velocità a quote differenti viene, quindi, utilizzata, ove necessario, una semplice interpolazione lineare.

4.2 Tempi di misurazione

Tipicamente i sistemi di misurazione per il rilievo delle correnti definiscono un tempo di campionamento ed un intervallo di media. I tempi di campionamento tipici sono variabili tra intervalli di 25-30 min ed 1 ora. Valori ampi di tali intervalli sono consentiti in genere dalle dinamiche di variazione della velocità media delle correnti marine, che presentano in genere variazioni graduali e tipicamente periodiche. Frequenze di acquisizione significativamente maggiori sono necessarie nel caso si sia interessati allo studio di dettaglio di fenomeni di turbolenza.

4.3 Esempi di lettura dati

Si riporta di seguito un esempio di dati rilevati dal profilometro sonico.

Tabella 1. Dati tipici rilevati da un profilometro sonico (rilievi in 5 istanti di campionamento).

Sample	#	1	2	3	4	5	6	...
Y	()	2013	2013	2013	2013	2013	...	...
M	()	7	7	7	7	7	...	...
Date	()	17/07/2013	17/07/2013	17/07/2013	17/07/2013	17/07/2013	...	...
H	()	13	13	13	14	14	...	...
M	()	0	25	50	15	40	...	...
S	()	0	0	0	0	0	...	...
		17/7/13 13:00	17/7/13 13:25	17/7/13 13:50	17/7/13 14:15	17/7/13 14:40		
Cell01	Vx(cm/s)	-127	-118.5	-103.5	-73.6	-70.3		
Cell01	Vy(cm/s)	45	35.4	35.4	11.1	12.8		
Cell01	Vz(cm/s)	-4.7	-6	-4.9	-1.9	-2.2		
Cell01	Spd(cm/s)	134.7	123.7	109.4	74.4	71.5		
Cell01	Dir(deg)	289.5	286.6	288.9	278.6	280.3		
Cell02	Vx(cm/s)	-138.6	-123.9	-113.4	-87.9	-80.3		
Cell02	Vy(cm/s)	48.6	38.8	38.9	9.6	16		
Cell02	Vz(cm/s)	-5.9	-5.6	-4.4	-4.2	-0.4		
Cell02	Spd(cm/s)	146.9	129.8	119.9	88.4	81.9		
Cell02	Dir(deg)	289.3	287.4	288.9	276.2	281.3		
Cell03	Vx(cm/s)	-145.9	-127.8	-111.8	-91.6	-80.8		

Cell03	Vy(cm/s)	49	40.9	36.5	9.6	22.7		
Cell03	Vz(cm/s)	-5.1	-4.1	-4.4	-4.2	-1.4		
Cell03	Spd(cm/s)	153.9	134.2	117.6	92.1	83.9		
Cell03	Dir(deg)	288.6	287.7	288.1	276	285.7		
Cell04	Vx(cm/s)	-153.8	-130.7	-113.7	-89	-84.5		
Cell04	Vy(cm/s)	52	40	37.6	10.9	20.8		
Cell04	Vz(cm/s)	-4.5	-5.1	-5.6	-2.4	0.1		
Cell04	Spd(cm/s)	162.4	136.7	119.8	89.7	87		
Cell04	Dir(deg)	288.7	287	288.3	277	283.8		
Cell05	Vx(cm/s)	-150.3	-136.7	-112.6	-90.7	-89.3		
Cell05	Vy(cm/s)	52.1	43.5	33.2	13.7	18.2		
Cell05	Vz(cm/s)	-3.5	-5.6	-5.9	-1.9	0.1		
Cell05	Spd(cm/s)	159.1	143.5	117.4	91.7	91.1		
Cell05	Dir(deg)	289.1	287.7	286.4	278.6	281.5		
Cell06	Vx(cm/s)	-154.1	-140.7	-108.2	-92.6	-92		
Cell06	Vy(cm/s)	50.3	47.6	32.8	14.8	15.2		
Cell06	Vz(cm/s)	-2.3	-6.7	-4.8	-1.6	1.4		
Cell06	Spd(cm/s)	162.1	148.5	113.1	93.8	93.2		
Cell06	Dir(deg)	288.1	288.7	286.9	279.1	279.4		
Cell07	Vx(cm/s)	-150.2	-140.7	-106.1	-95.1	-93.7		
Cell07	Vy(cm/s)	55.1	51.7	29.5	17	14.5		
Cell07	Vz(cm/s)	-0.2	-5.8	-4.7	-0.4	0.6		
Cell07	Spd(cm/s)	160	149.9	110.1	96.6	94.8		
Cell07	Dir(deg)	290.1	290.2	285.5	280.1	278.8		
Cell08	Vx(cm/s)	-144.1	-140.4	-109.4	-93.8	-93.4		
Cell08	Vy(cm/s)	55	56.2	29.9	18.6	11.5		
Cell08	Vz(cm/s)	0.9	-8.1	-3.7	-0.5	0		
Cell08	Spd(cm/s)	154.2	151.2	113.4	95.6	94.1		
Cell08	Dir(deg)	290.9	291.8	285.3	281.2	277		
Cell09	Vx(cm/s)	-145.2	-135.4	-106.6	-86.6	-88.3		
Cell09	Vy(cm/s)	50.5	53.6	31.1	15.3	8.2		
Cell09	Vz(cm/s)	0.6	-7.7	-3.3	0	1.1		
Cell09	Spd(cm/s)	153.7	145.6	111	87.9	88.7		
Cell09	Dir(deg)	289.2	291.6	286.3	280	275.3		
Cell10	Vx(cm/s)	-143.2	-135.4	-106.9	-84.8	-87.9		
Cell10	Vy(cm/s)	46.1	48.3	29.1	17.4	6.8		
Cell10	Vz(cm/s)	1.8	-8	-2.7	0.6	1.2		
Cell10	Spd(cm/s)	150.4	143.8	110.8	86.6	88.2		
Cell10	Dir(deg)	287.8	289.6	285.2	281.6	274.4		

Nella tabella sono riportate per ciascun istante di rilievo, acquisito ad una assegnata frequenza di campionamento, le componenti di velocità e la direzione della corrente. Lo strumento, posto sul fondale, rileva la velocità media all'interno di opportuni volumi di misura (*celle di misura*, nell'esempio in numero di 10) in cui viene suddivisa la colonna d'acqua che grava sullo strumento.

A titolo di esempio, nella figura seguente, si riporta un tipico andamento della velocità a 10.8 m di profondità, misurato in un determinato intervallo di osservazione, nel sito di rilievo equipaggiato con il correntometro acustico. La velocità riportata è la velocità risultante nel piano orizzontale.

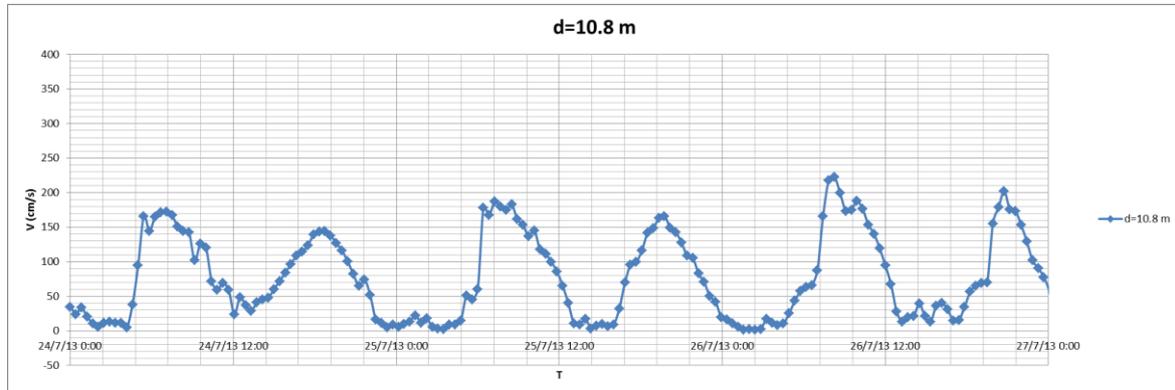


Figura 6. Modulo della velocità rilevata a 10.8 m di profondità.

Il profilo temporale di velocità è funzione della profondità. Ad esempio, nello stesso sito, ad una profondità diversa, si rilevano i valori di velocità riportati nella figura seguente.

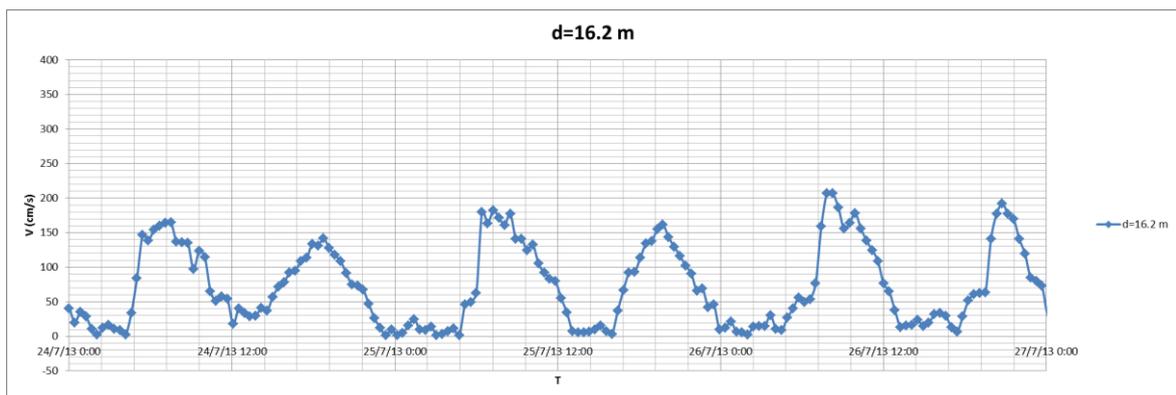


Figura 7. Modulo della velocità rilevata a 16.2 m di profondità.

4.4 Metodologia di analisi

4.4.1 Analisi qualitativa delle storie temporali

Dalle storie temporali delle grandezze misurate è possibile ottenere informazioni qualitative sull'andamento della corrente. Si riporta di seguito un esempio di andamento temporale della corrente nel sito ad una assegnata profondità. In particolare nella figura seguente sono riportati gli andamenti temporali della velocità e della direzione della corrente ad una fissata profondità.

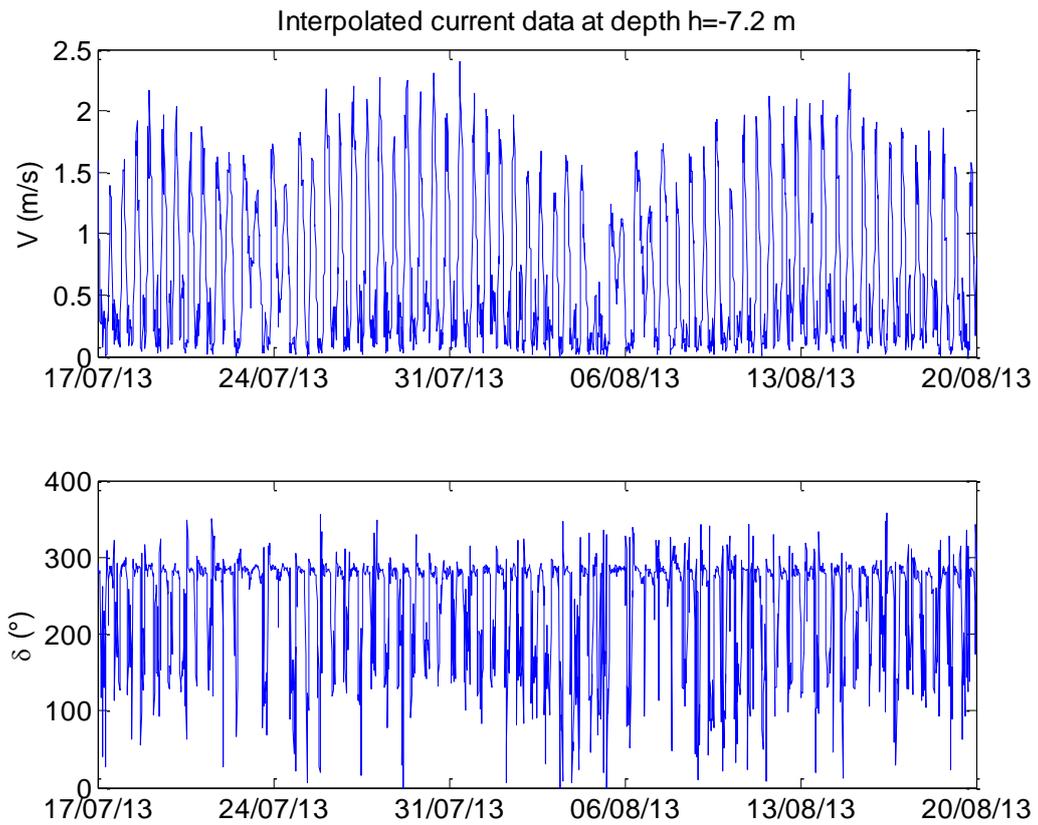


Figura 8. Velocità nel piano orizzontale e direzione della corrente nel sito di installazione a 7.2 m di profondità.

Si può osservare il caratteristico andamento periodico della velocità con la presenza di due picchi giornalieri (si veda il dettaglio nella figura seguente).

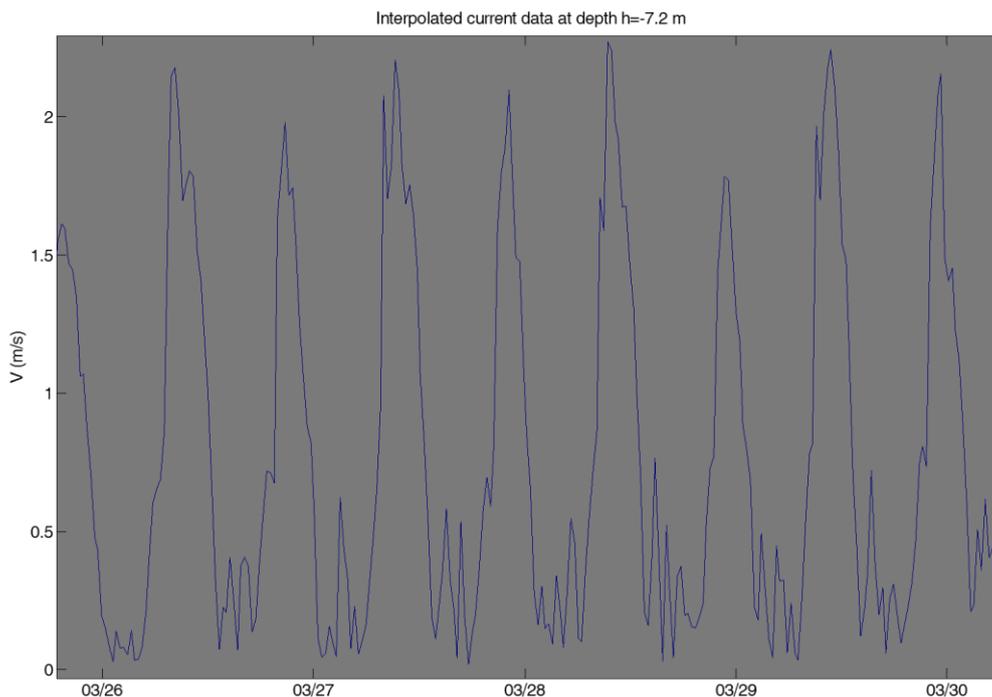


Figura 9. Velocità della corrente nel sito di esempio a 7.2 m di profondità (dettaglio temporale).

La presenza di due picchi abbastanza ben definiti può essere confermata dalla sovrapposizione degli andamenti giornalieri della velocità, di seguito riportata.

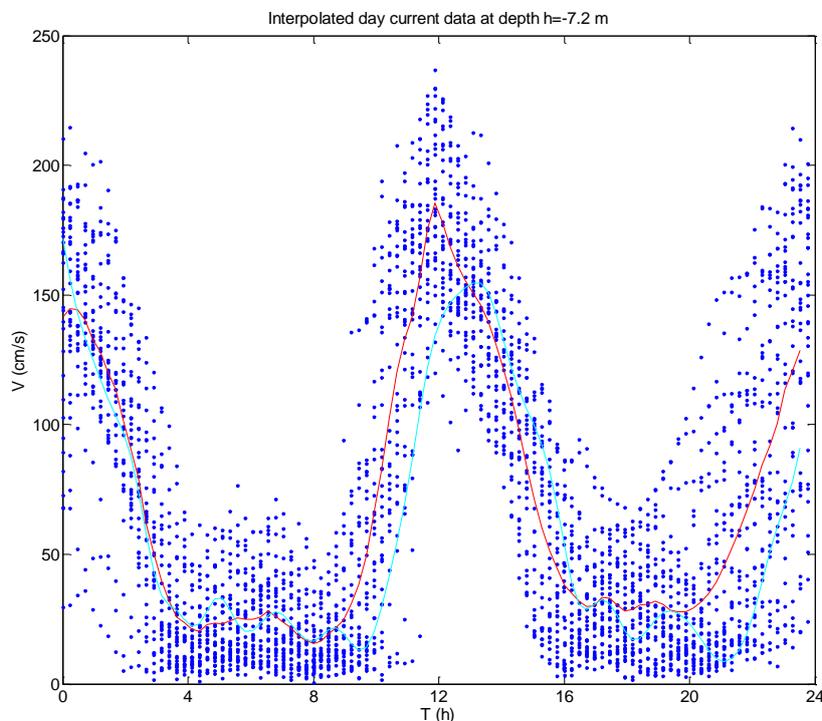


Figura 10. Sovrapposizione degli andamenti giornalieri medi, con l'individuazione di due picchi della velocità della corrente (profondità di 7.2 m).

Andamenti simili sono osservabili a diverse profondità, con diversi valori delle velocità. I valori riportati sono ottenuti ad istanti assegnati nella giornata, per interpolazione delle misure effettuate. In figura sono

riportati anche gli andamenti medi giornalieri stimati con una *spline* cubica approssimante (linea blu), e mediando direttamente i valori interpolati nello stesso istante (linea rossa).

Oltre alle variazioni giornaliere è possibile osservare una variazione approssimativamente ciclica dei picchi, con periodo approssimativamente mensile, probabilmente connessa con i cicli lunari.

La corrente presenta inoltre una tipica inversione di direzione, come si può osservare nella figura seguente, che riporta l'andamento giornaliero della direzione della corrente.

Si nota comunque che l'inversione della direzione non è completa (rotazione di 180°). Esistono però due direzioni prevalenti di flusso della corrente (approssimativamente, circa 280° e circa 140°; si nota però una notevole incertezza nella determinazione delle direzioni di flusso, tra l'altro variabili in funzione della profondità).

Va osservato che nei rilievi sperimentali qui utilizzati come esempio, lo studio della direzione di flusso era di importanza secondaria e non sono noti dettagli sulla caratterizzazione della effettiva distribuzione di occorrenza delle direzioni di flusso.

Si nota, inoltre, che le due direzioni di flusso della corrente presentano picchi di velocità differenti in genere. La corrente che fluisce con orientazione di circa 280° presenta infatti valori significativamente maggiori.

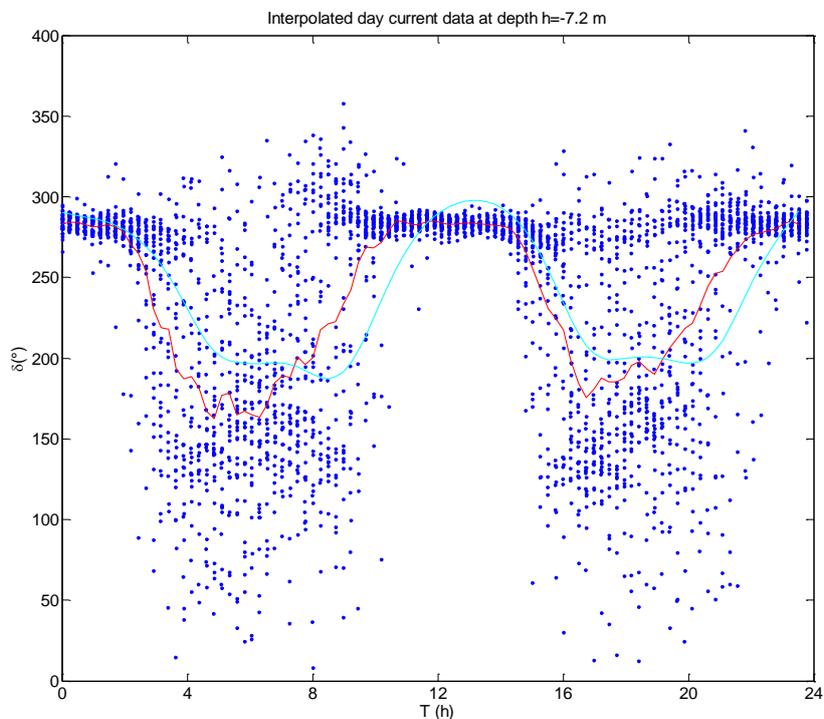


Figura 11. Variazioni giornaliere della direzione della corrente.

Mentre la ripetitività diurna e mensile sono caratteristiche dei fenomeni di marea lunisolare, gli altri comportamenti asimmetrici descritti possono essere caratteristici dello specifico sito.

4.4.2 Stime sperimentali di probabilità della velocità

Semplici analisi statistiche possono essere applicate per estrarre informazioni dai dati grezzi rilevati. Per ogni profondità è possibile determinare un istogramma con le probabilità di occorrenza di un dato livello di velocità.

Ad esempio, a 9 m di profondità, la frequenza di occorrenza della velocità è riportata nella figura seguente.

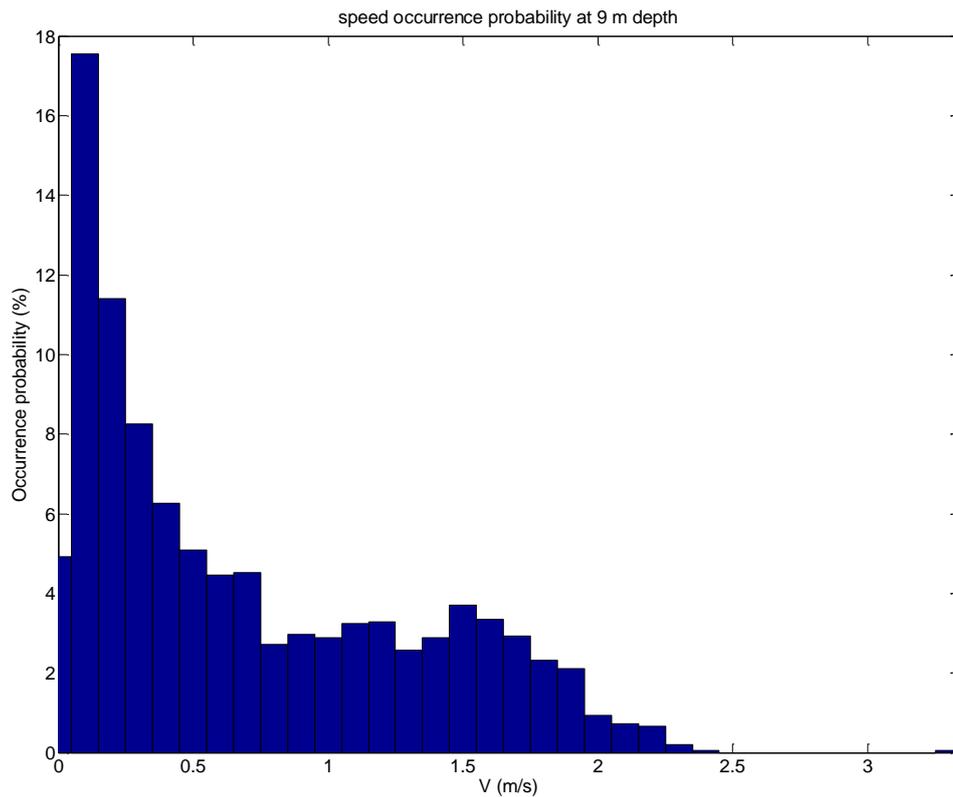


Figura 12. Istogramma della velocità nel sito di esempio, ad una profondità d 9 m.

Ad una diversa profondità la distribuzione di probabilità può essere diversa, ad esempio nello stesso sito a 7m di profondità si ottiene l'andamento di seguito riportato.

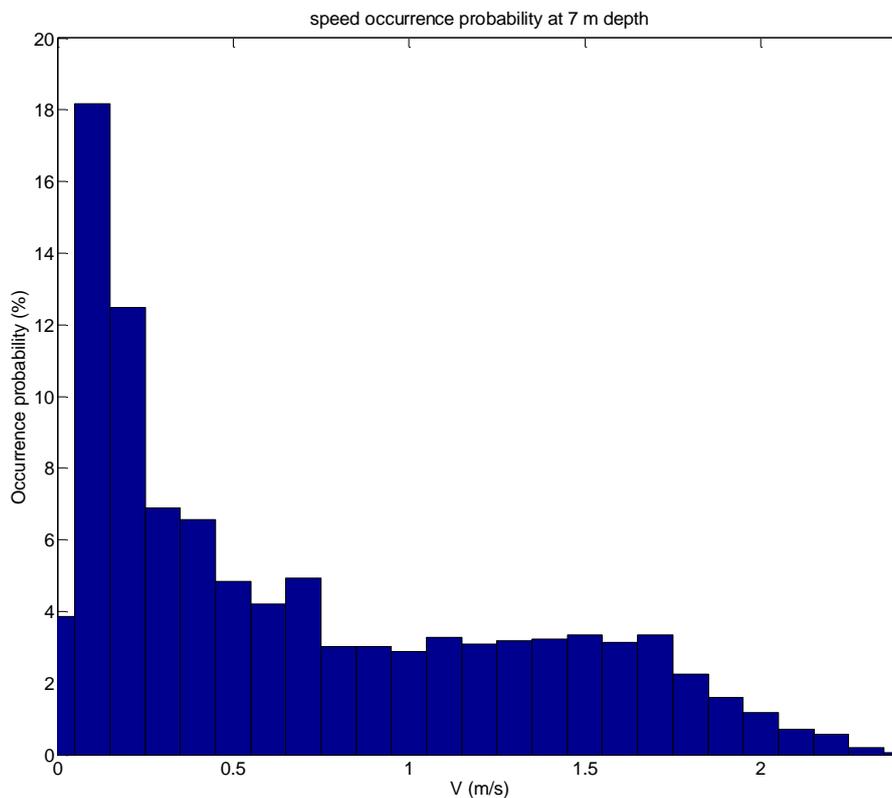


Figura 13. Istogramma della velocità nel sito di esempio, ad una profondità d 7 m.

4.4.3 Caratterizzazione statistica della distribuzione di velocità

Una prima semplice caratterizzazione della distribuzione statistica della velocità può essere ottenuta considerando i valori medi della velocità della corrente alle varie quote di misura. Sempre in riferimento al sito di riferimento prescelto, si riportano i valori medi della velocità alle diverse profondità di misura.

Tabella 2. Velocità al variare della profondità.

Depth (m)	V _{media} (m/s)	V _(1/7 power law) (m/s)	V _{max} (m/s)
1.8	0.693	0.693	2.370
3.6	0.694	0.682	2.421
5.4	0.697	0.671	2.414
7.2	0.698	0.659	2.403
9.0	0.698	0.645	2.447
10.8	0.693	0.628	2.472
12.6	0.684	0.609	2.439
14.4	0.672	0.585	2.414
16.2	0.650	0.554	2.313
18.0	0.598	0.505	2.183

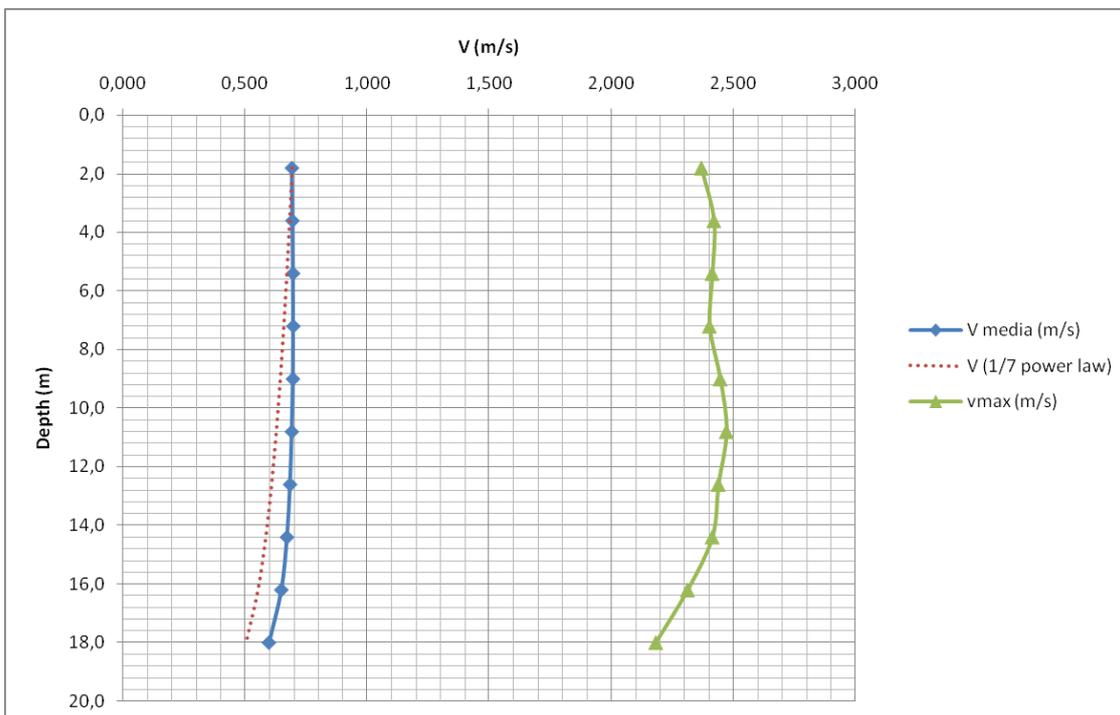


Figura 14. Velocità media al variare della profondità.

Nella figura precedente è riportata la velocità media in funzione della profondità insieme ad un andamento teorico della velocità, tipicamente adottato negli studi sulle correnti marine, in cui si assume che la velocità vari con la profondità con la potenza di esponente 1/7. Si può notare una certa discrepanza tra i valori medi sperimentali e la predizione basata sulla legge empirica assunta. L'andamento sperimentale presenta infatti una regione relativamente piatta alle basse profondità. Nella stessa figura sono riportate anche le velocità massime (dopo aver rimosso alcuni picchi irregolari).

E' possibile, inoltre, tentare una caratterizzazione parametrica della distribuzione di velocità, assegnando una distribuzione statistica dipendente da parametri e ricercando i valori dei parametri tali da ottenere una distribuzione aderente alla distribuzione sperimentale.

Come distribuzione statistica è possibile adottare una distribuzione di Weibull. La distribuzione di Weibull è una distribuzione asimmetrica che si presta a descrivere alcuni fenomeni fisici con un certo grado di aleatorietà. Tale tipo di distribuzione trova applicazione in altri campi di valutazione dei caratteri statistici del moto di fluidi naturali, come ad esempio nel caso delle analisi anemometriche. La distribuzione di Weibull dipende da due parametri, il fattore di scala, c , che ha le dimensioni di una velocità, e il fattore di forma, k , adimensionale. Tali parametri definiscono la collocazione lungo l'asse delle velocità (parametro di scala) e la dispersione intorno al valore medio (parametro di forma).

La densità di probabilità della distribuzione di Weibull ha la seguente forma:

$$p(V) = \frac{k}{c^k} V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}$$

Il metodo di stima dei parametri adottato è il metodo della massima verosimiglianza. Con tale tecnica è possibile determinare i valori di k e c , per stimare la distribuzione teorica approssimata.

Si riportano un confronto tra l'istogramma sperimentale e la distribuzione teorica ottenuta per una profondità assegnata.

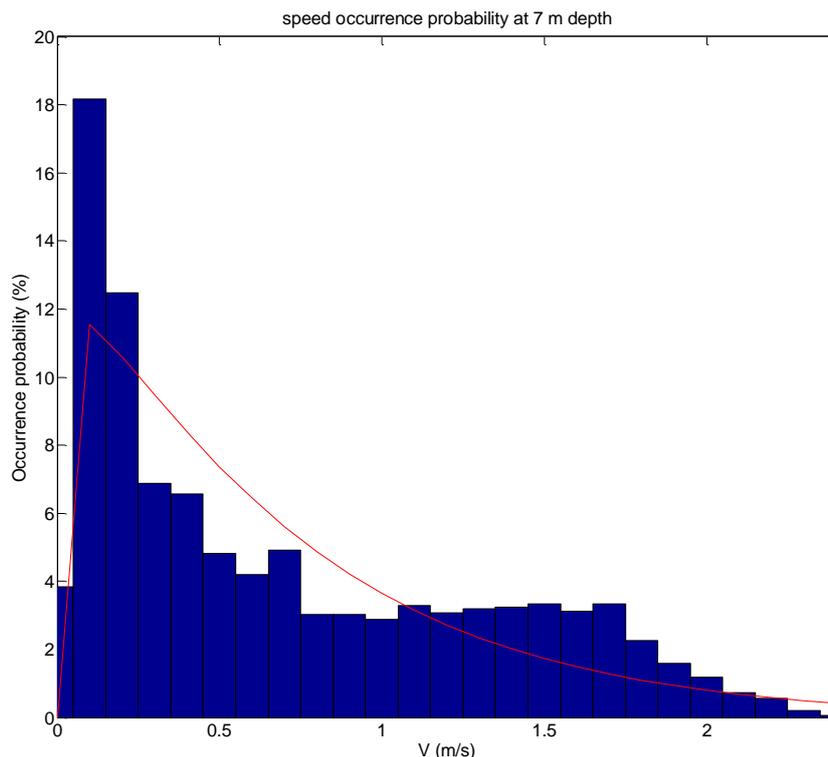


Figura 15. Distribuzione di Weibull (velocità alla profondità di 7 m).

Si nota una certa difficoltà nella determinazione di una adeguata rappresentazione statistica del fenomeno. In particolare sia la coda di probabilità per velocità alte, che la frazione a velocità basse non sempre sono descritte adeguatamente dal modello presentato, che fornisce una descrizione qualitativa delle distribuzioni statistiche sperimentali. Ad esempio, un problema tipico, riscontrato anche in altri contesti, è connesso con la circostanza che per valori del fattore di forma maggiori di 1, la distribuzione di Weibull fornisce una densità di probabilità teoricamente nulla, condizione in genere in disaccordo con le osservazioni sperimentali.

5 Conclusioni e sviluppi futuri

Utilizzando opportuni sistemi di misura dedicati alla rilevazione di profili di velocità della corrente è possibile ricostruire le caratteristiche del flusso in specifici siti marini di interesse per lo sfruttamento delle risorse energetiche da correnti fluide.

Tra i sistemi di misura della velocità della corrente, si presentano come particolarmente idonei i profilometri sonici basati sull'effetto Doppler, che hanno la capacità di registrare i profili di velocità tridimensionali, in funzione della profondità. Classiche metodologie di semplice analisi statistica possono essere applicate ai dati di velocità misurati.

Le analisi effettuate sulle rilevazioni di dati sperimentali di velocità delle correnti marine possono fornire un punto di partenza per successive analisi in termini di valutazione della sfruttabilità energetica di un sito.

I valori di velocità osservati possono, inoltre, essere utilizzati come termine di confronto per la validazione di stime numeriche della velocità. In particolare i dati possono essere usati per validare i modelli tridimensionali CFD più complessi (come ad esempio quello messo a punto dall' ENEA (RdS/2013/228) per la predizione dell'andamento delle correnti nel Mediterraneo una volta nota la batimetria del fondo marino e le condizioni al contorno.

Curriculum Vitae et Studiorum di Domenico Coiro

Dati Anagrafici:

Nato a S.Rufo (Sa) il 4 luglio 1960. Celibe.

Abitazione:

Via S. Francesco ai Gerolomini 5,
80078 Pozzuoli (NA).

Contatti:

Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale

Via Claudio 21

80125 Napoli

tel. 081-7683322

e. mail: coiro@unina.it

web: www.adag.unina.it

Studi Medi:

Maturita' Classica conseguita nel 1978 presso il liceo Marco Tullio Cicerone di Sala Consilina.

Studi Universitari:

Laureato con 110/110 e la lode nel luglio 1985 in Ingegneria Aeronautica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Napoli " Federico II " discutendo la tesi dal titolo: "*Metodi Integrali di Strato limite Inverso ed Applicazioni Numeriche*".

Esperienze di lavoro:

Dal Luglio 1985 al Luglio 1986, interno all'Istituto di Gasdinamica dell'Università di Napoli, ha lavorato in collaborazione con il personale della Direzione Tecnica dell'ALENIA di Pomigliano d'Arco.

Dall'Agosto 1986 al Maggio 1987, assistente universitario presso il Department of Aerospace Engineering, Pennsylvania State University, State College, U.S.A.

Dal Giugno 1987 all'Ottobre 1990, responsabile del settore dell'aerodinamica subsonica e transonica del CIRA, Centro Italiano Ricerche Aerospaziali.

Dal Novembre 1990 al 1999, Ricercatore confermato presso il Dipartimento di Progettazione Aeronautica (ex Istituto di Progetto Velivoli) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli " Federico II ".

Dal 2000 professore associato nel settore ING-IND/03 – Meccanica del Volo - presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" ed afferisce al Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale.

Attualmente **professore ordinario** presso l' Università' degli Studi di Napoli "Federico II"

Attività di Ricerca:

Durante la sua permanenza al CIRA e al Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale ha presentato numerose memorie scientifiche a congressi nazionali ed internazionali alcune delle quali sono state pubblicate su riviste nazionali ed internazionali e sono state citate più volte da altri ricercatori del settore. Coordina il gruppo di ricerca *Aircraft Design AeroFlightdynamics Group ADAG* (www.adag.unina.it) **composto mediamente da 12 unita'**

I temi di ricerca hanno riguardato il mondo aeronautico e quello delle energie rinnovabili. In questo specifico settore i temi principali sono:

- Modelli numerici, design, costruzione e test sperimentali di turbine eoliche ed idrauliche per lo sfruttamento del vento, delle correnti marine e fluviali ad asse verticale e ad asse orizzontale. Primo firmatario di un brevetto internazionale e di due nazionali, riguardanti sistemi innovativi basati su turbine sia ad asse verticale che orizzontale.
- Progettazione, installazione e test, sia a terra sia a mare, di innovativi sistemi per produzione di energia pulita dal vento e dalle correnti marine e fluviali.

- Fondatore e presidente della società di Spin-off accademico EOLPOWER Srl, il cui obiettivo principale è la produzione di piccole turbine eoliche ad asse orizzontale e verticale (1-60 kW) che ha vinto la Start Cup della Federico II ed il premio CIBA Park quale migliore idea imprenditoriale

È stato invitato a tenere seminari su temi connessi alle energie rinnovabili in tutto il mondo. In particolare ha tenuto due seminari **su specifico invito** presso **Massachusetts Institute of Technology MIT di Boston** dai seguenti titoli:

- 1) Harvesting tidal current energy: scientific and technological aspects
- 2) Economics of harvesting tidal current energy

Ha partecipato a varie trasmissioni televisive (*Ambiente Italia, Leonardo, Tg3 Campania, TG3 Sicilia*) e radiofoniche (*Baobab Radio 1*) nonché è stato intervistato da varie testate giornalistiche a diffusione nazionale (*Quark, Il Sole 24 ore, Corriere della Sera, Corriere del Mezzogiorno, Energie Rinnovabili*) su tematiche connesse alle energie rinnovabili. È citato nel libro *“I nuovi primati del Sud”* di Antonio Parlato e Paolo Trapani, Dicembre 2002.

È stato coordinatore scientifico di un progetto bilaterale tra Italia e Cina finanziato dal Ministero degli Esteri nell'ambito del Programma di Scambio Culturale tra Italia e Cina (2002-2005) nell'ambito delle energie rinnovabili.

È esperto valutatore per la comunità europea per le tematiche connesse all'energia eolica e da correnti marine.

È autore di più di 70 pubblicazioni su riviste e congressi internazionali. Per il CV completo si veda: www.adag.unina.it

Nomine e Premi

- È membro della commissione nazionale RINNOVA dell'ENEL per il premio Rinnova per le migliori tesi di laurea nei vari settori delle energie rinnovabili
- È stato nominato rappresentante del Polo delle Scienze e Tecnologie dell'Università degli Studi di Napoli “Federico II” per firmare un accordo quadro di cooperazione scientifica e tecnologica tra Italia e Cina nel Novembre 2007.
- È stato nominato rappresentante per l'Italia presso la CIEA (Aviation and Space Education Commission) della F.A.I. (Federation Aeronatique International)
- È stato nominato rappresentante per l'Italia presso l'OSTIV (Organisation Scientifique et Technique Internationale du Vol à Voile)
- È stato selezionato come esperto valutatore per il VII Programma Quadro della Comunità Europea nel 2004 e nel 2008.
- È stato insignito del premio internazionale Paul Tissandier della Federation Aeronatique International F.A.I. *“en reconnaissance des remarquables services rendus a l'aeronatique”*
- È fondatore e presidente della società di Spin-Off accademico EOLPOWER Srl che è risultata vincitrice del premio Start Cup 2006 dell'Università degli Studi “Federico II” e del CIBAPARK, incubatore d'impresa, per l'edizione del 2006.
- È rappresentante UNIDO (United Nation Industrial Development Organization) presso il Global Renewable Energy Forum GREF
- È rappresentante italiano in seno all'International Energy Agency (IEA) per le attività connesse al mini-eolico
- È presidente del consorzio pubblico privato SEAPOWER costituito tra l'Università Federico II e la società Eolpower Investments Srl.

Brevetti ed Elenco Principali Pubblicazioni

- **E' primo firmatario del brevetto internazionale della turbina KOBOLD n. WO 2005/024226 A1**
- **E' primo firmatario della domanda di brevetto nazionale della turbina MYHTOS n. RM 2009 A 197**
- **E' firmatario della domanda di brevetto europeo del sistema per la produzione di energia da correnti marine GEM n. CS2010A000016**

Autorizzo il trattamento dei miei dati personali ai sensi del Dlgs 196 del 30 giugno 2003

Napoli 28-9-2013


Domenico Coiro