



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Stima della produzione energetica da correnti marine nello Stretto di Messina

Domenico Coiro, Giancarlo Troise



*Università degli Studi di Napoli
"Federico II"*



*Dipartimento di Ingegneria
Aerospaziale*

STIMA DELLA PRODUZIONE ENERGETICA DA CORRENTI MARINE NELLO STRETTO DI MESSINA

Domenico Coiro, Giancarlo Troise (Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine

Responsabile del Progetto: Giammaria Sannino, ENEA

Indice

Sommario	5
Introduzione.....	6
<i>Generalità.....</i>	<i>6</i>
<i>Stime di lavori precedenti.....</i>	<i>6</i>
Corpo del rapporto	7
1. <i>Sistemi di conversione dell'energia delle correnti marine</i>	<i>7</i>
1.1. <i>Sistema MCT SeaGen.....</i>	<i>8</i>
1.2. <i>Sistema Kobold.....</i>	<i>8</i>
1.3. <i>Sistema GEM</i>	<i>9</i>
1.4. <i>Sistema Fri-El.....</i>	<i>10</i>
1.5. <i>Sistema Verdant Power</i>	<i>12</i>
2. <i>Stima delle curve di potenza.....</i>	<i>13</i>
2.1. <i>Efficienza del generatore.....</i>	<i>13</i>
2.2. <i>Adattamento delle curve di potenza al sito in esame</i>	<i>13</i>
2.3. <i>Curve di potenza assunte</i>	<i>13</i>
3. <i>Confronto dei sistemi di conversione</i>	<i>14</i>
3.1. <i>Efficienza di conversione</i>	<i>14</i>
3.2. <i>Caratteristiche tecniche e problematiche di installazione.....</i>	<i>15</i>
3.3. <i>Impatto sull'ambiente marino.....</i>	<i>15</i>
3.4. <i>Tabella riepilogativa di confronto</i>	<i>16</i>
4. <i>Valutazione della produzione energetica</i>	<i>17</i>
4.1. <i>Stime di produzione.....</i>	<i>18</i>
4.2. <i>Distanze assunte tra le unità di produzione</i>	<i>18</i>
5. <i>Distanza longitudinale ed effetti di scia (effetto schiera)</i>	<i>21</i>
6. <i>Stima della velocità della corrente</i>	<i>23</i>
6.1. <i>Dati delle tabelle di marea</i>	<i>23</i>
6.2. <i>Storie temporali delle velocità della corrente.....</i>	<i>26</i>
6.3. <i>Correzione della velocità in siti diversi dello stretto</i>	<i>27</i>
6.4. <i>Dati sperimentali di velocità della corrente: Rilievo di dettaglio delle velocità in un singolo punto di misura (Punta S. Raineri).....</i>	<i>29</i>
7. <i>Vincoli di installazione</i>	<i>35</i>
7.1. <i>Limitazioni legate alla navigabilità</i>	<i>35</i>
7.2. <i>Limitazioni paesaggistiche e ambientali</i>	<i>35</i>
8. <i>Produzione teorica nella sezione di riferimento (metodo del flusso di energia)</i>	<i>36</i>

8.1.	<i>Stime teoriche preliminari</i>	36
8.2.	<i>Una valutazione di producibilità basata sul flusso di energia cinetica</i>	39
9.	<i>Stime di produzione in ipotetiche installazioni di fattorie marine (metodo delle fattorie-farm)</i>	40
9.1.	<i>Osservazioni ed ipotesi di calcolo delle produzioni di energia</i>	40
9.2.	<i>Valutazione preliminare dei siti in base alle velocità massime</i>	42
9.3.	<i>Aree di installazione prescelte</i>	42
9.4.	<i>Stime basate sulle velocità ricavate dalle tavole di marea</i>	45
9.5.	<i>Stime basate sui dati rilevati in un sito di misura (Punta S. Raineri)</i>	49
Osservazioni e conclusioni sulle stime di produzione		50
Bibliografia		52

Indice delle figure

Figura 1. Sistema MCT SeaGen. (fonte [6])	8
Figura 2. Visione pittorica della installazione della turbina ad asse verticale Kobold	9
Figura 3. Prototipo del sistema GEM	10
Figura 4. Schema di funzionamento del GEM: senza corrente (sinistra), in corrente (destra).	10
Figura 5. Sistema Fri-El a filari.	11
Figura 6. turbina marina <i>Verdant Power, Free flow</i>	12
Figura 7. Curva di Potenza assunta per il sistema MCT SeaGen (due turbine ad asse orizzontale)	14
Figura 8. Andamento della velocità nella scia di una turbina secondo il modello semplificato di Jensen, in funzione della distanza a valle della turbina adimensionalizzata rispetto al diametro. $CT=0.89$, $k=0.075$	22
Figura 9. Batimetria dello stretto di Messina alla latitudine del sito di riferimento Punta Pezzo.	24
Figura 10. Batimetria dello stretto di Messina con indicazione delle curve isobatimetriche fino a 500 m.	24
Figura 11. Batimetria dello stretto di Messina con indicazione delle curve isobatimetriche fino a 500 m – dettaglio	25
Figura 12. Storia temporale delle calme e dei picchi di velocità nella località Punta Pezzo (anno 2004). Corrente entrante (+), corrente uscente (-).	26
Figura 13. Dettaglio della storia temporale delle velocità nel sito di riferimento di Punta Pezzo. (interpolazione cubica)	27
Figura 14. Posizione dei siti di rilievo secondari nello stretto di Messina.	28
Figura 15. Sito di installazione del sistema di misura della corrente (ADCP), relativamente prossimo alla costa.	29
Figura 16. Sito di installazione, area interessata	30
Figura 17. Sito di installazione, dettaglio	30
Figura 18. Profili di velocità media e massima con la profondità	32
Figura 19. Storia temporale della velocità e della direzione della corrente nel periodo di osservazione. I valori riportati si riferiscono ai dati interpolati ad una profondità di 5 m.	33
Figura 20. Velocità della corrente, andamento medio in un giorno. Dati interpolati alla profondità di 5m. .	34
Figura 21. Direzione della corrente, andamento medio in un giorno. Dati interpolati alla profondità di 5m.	34

Figura 22. Aree destinate alla navigazione e di precauzione. Limiti pratici alla installazione di impianti.	35
Figura 23. Velocità nei punti noti in superficie per il calcolo della velocità nella sezione (punto di riferimento Punta Pezzo, e località secondaria Pace).....	37
Figura 24. Distribuzione di velocità ipotizzata nella sezione dello stretto in corrispondenza della località Punta Pezzo. Le curve di livello indicano le velocità in m/s estrapolate a partire dalle stime note nelle due località di Punta Pezzo e Pace ed adottando una legge esponenziale per la variazione di velocità con la profondità. La distribuzione è relativa alla condizione di velocità massima a Punta Pezzo. (dimensioni non in scala)	37
Figura 25. Potenza cinetica della corrente nella sezione dello Stretto a Punta Pezzo.....	38
Figura 26. Aree di installazione di ipotetiche fattorie energetiche marine.	43
Figura 27. Aree di installazione prescelte (blu) con indicazione dei siti di misura e delle curve isobatimetriche a.....	43

Indice delle tabelle

Tabella 1. Stime di produzione di lavori precedenti.....	7
Tabella 2. Comparazione delle efficienze dei sistemi considerati: confronto dei coefficienti di potenza.	15
Tabella 3. Caratteristiche tecniche ed operative.....	16
Tabella 4. Occupazione delle aree, impatto ed interferenza con altre attività.....	17
Tabella 5. Indicazioni sui costi attesi.	17
Tabella 6. Dimensioni caratteristiche per il sistema MCT SeaGen (asse orizzontale).....	19
Tabella 7. Dimensioni caratteristiche per il sistema Kobold (asse verticale)	19
Tabella 8. Dimensioni caratteristiche per il sistema GEM (asse orizzontale).....	19
Tabella 9. Dimensioni caratteristiche per il sistema Fri-El (asse orizzontale) rotazione del sistema complessivo	20
Tabella 10. Dimensioni caratteristiche per il sistema Verdant Power (asse orizzontale)	20
Tabella 11. Densità di installazione per i sistemi considerati di taglia 1 MW.	21
Tabella 12. Tabella delle velocità della corrente nella località Punta Pezzo, mese di Gennaio 2004.	25
Tabella 13. Calcolo delle velocità in località secondarie in base alle predizioni nella località di riferimento Punta Pezzo. Coefficienti di correzione.....	28
Tabella 14. Caratterizzazione del sito di misura in base alle velocità misurate a diverse profondità.....	31
Tabella 15. Stime di producibilità in base al metodo del flusso di energia (SIF=20%).	39
Tabella 16. Distanza tra la curva di livello a -20 m e la curva limite operativa (valutazione di massima basata sulla distanza misurata nella direzione est-ovest)	40
Tabella 17. Distanze utilizzabili normali alla linea di costa – (stime approssimate da Google Earth).....	40
Tabella 18. Densità di installazione dei sistemi considerati.	41
Tabella 19. Velocità massime nei siti di interesse.	42
Tabella 20. Produzioni fattorie – sistema MCT SeaGen	46
Tabella 21. Produzioni fattorie – sistema Kobold.....	46
Tabella 22. Produzioni fattorie – sistema GEM	47
Tabella 23. Produzioni fattorie – sistema Fri-El.....	47
Tabella 24. Produzioni fattorie – sistema Verdant Power.....	48

Tabella 25. Energia annua prodotta in base ai rilievi della stazione presso punta S. Raineri – Stime basate sulle velocità interpolate a -5 m di profondità. Area 7	49
Tabella 26. Energia annua prodotta in base ai rilievi della stazione presso punta S. Raineri – Stime basate sulle velocità interpolate a -5 m di profondità. Area 3	49
Tabella 27. Stime di producibilità in base al metodo del flusso di energia (SIF=20%).	50
Tabella 28. Energia annua prodotta stimata complessivamente.....	51

Sommario

Il presente lavoro si inserisce nel contesto della stima del potenziale energetico connesso allo sfruttamento delle correnti marine nel territorio italiano. In particolare, si è individuata un'area di notevole interesse nel territorio italiano per la eventuale installazione di impianti di conversione della energia delle maree, collocata nello Stretto di Messina. A tale area si riferiscono la analisi svolte nel presente studio.

Si sono presi in esame diversi punti di rilievo. La fonte principale è costituita dai dati di marea e di corrente (riportati dalle Tavole di Marea emesse dall'Istituto Idrografico della Marina). Tali dati sono derivati da una serie di indagini sperimentali condotte nello stretto in diversi punti di rilievo. In base a tali informazioni è possibile ricostruire l'andamento temporale in un anno, preso come periodo di riferimento, della velocità della corrente. Inoltre, è stato considerato, in maniera complementare, un sito di rilievo in cui i dati sono stati registrati da un sistema di misura acustico.

Sono state, inoltre, prese in considerazione diverse tipologie di macchine per la conversione dell'energia delle correnti, esaminando diversi sistemi, per valutare le produzioni relative ad impianti costituiti da fattorie comprendenti un numero di unità compatibile con le dimensioni fisicamente disponibili e praticamente sfruttabili senza interferire eccessivamente con le attività marine svolte nell'area in esame.

Introduzione

Generalità

Nel contesto dello sfruttamento delle risorse energetiche del territorio italiano, sia in vista di obiettivi strategici di rilievo internazionale sia nell'ottica di una riduzione della dipendenza energetica da fonti fossili, lo sfruttamento di fonti rinnovabili è ormai notoriamente riconosciuto di primaria importanza.

Tra le fonti energetiche rinnovabili di maggiore interesse per il territorio italiano, vista la notevole estensione costiera, gioca un ruolo estremamente interessante lo sfruttamento di risorse energetiche marine, nelle diverse forme disponibili (moto ondoso, correnti marine). Nonostante il potenziale apparentemente notevole, lo sviluppo di impianti di produzione energetica da fonti fluide marine è ancora relativamente ridotto. Tra le tecnologie più promettenti e in alcuni casi già giunte ad un significativo livello di maturità, le tecnologie di sfruttamento dell'energia delle correnti marine sembra fornire allo stato attuale risultati molto interessanti. Diversi sistemi di conversione sono stati progettati e in alcuni casi installati o in fase di commercializzazione.

Il presente documento ha come scopo la stima delle potenzialità connesse con lo sfruttamento dell'energia delle correnti marine, mediante diversi possibili sistemi di conversione.

Nel presente studio verranno adottate alcune ipotesi semplificative. In primo luogo si utilizzeranno dati di correnti relative a un singolo sito di rilevazione, identificato nello stretto di Messina, e considerato significativamente rappresentativo dell'effettivo potenziale energetico sfruttabile sul territorio nazionale visto che è l'unico sito dove le correnti raggiungono un minimo di intensità tale da poter rappresentare un interessante potenziale energetico.

Lo stretto di Messina possiede alcune caratteristiche che lo rendono effettivamente appetibile come sito di possibile installazione:

- livello della corrente media significativamente elevato
- caratteristiche oceanografiche e meteorologiche idonee

Esso presenta però alcune peculiarità che, al contrario, rendono difficile il suo sfruttamento completo:

- interferenza con la navigazione
- caratteristiche batimetriche del fondale

Tali caratteristiche, ed in particolare le condizioni climatiche ed il livello di velocità della corrente, rendono lo Stretto di Messina una sede ideale sia per l'installazione di impianti di prova, che per l'insediamento di impianti di produzione di media e grande scala.

Altre collocazioni posseggono caratteristiche meno appetibili, ad esempio la laguna veneta ha un più basso livello della corrente massima attesa e per la conformazione idrografica presenta un maggiore interferenza con la navigazione; inoltre, i fondali più bassi, che possono essere interessanti per installazioni iniziali di prova, riducono l'area effettiva di fruibilità per l'inserimento di impianti.

Altri siti ancora, come le Bocche di Bonifacio in prossimità della Sardegna e della Corsica, che pure presentano un minimo di correnti marine, non sembrano avere caratteristiche energeticamente interessanti e, tra l'altro, presentano caratteristiche meteorologiche meno facili da gestire oltre a profondità molto elevate (possibile complessità di installazione e manutenzione per alcune tipologie di impianto).

Stime di lavori precedenti

In letteratura sono presenti stime di produzione relative allo Stretto di Messina, inserite in contesti più ampi di stima delle risorse energetiche marine in Europa.

Si riportano da [1] alcune stime di produzione citate da altri report

Tabella 1. Stime di produzione di lavori precedenti

Studio	Energia annua (GWh)
JOULE 1996 [2]	186
OptCurrent 2001 [3]	89
RGU Scotland 2002 [4]	1300

Si può notare una notevole dispersione tra le stime riportate. Ciò è dovuto alla differenza tra i metodi di stima e alle differenze tra i dati utilizzati nei diversi studi. Tale dispersione indica comunque la difficoltà di fornire una stima corretta e di modellare adeguatamente i diversi fattori che influenzano le valutazioni di producibilità energetica.

Corpo del rapporto

1. Sistemi di conversione dell'energia delle correnti marine

Sarà preso in esame un insieme di diversi sistemi di conversione dell'energia delle correnti. In particolare si prenderanno in considerazione i seguenti sistemi:

- Sistema MCT SeaGen;
- Sistema KOBOLD;
- Sistema GEM.
- Sistema Fri-El
- Sistema Verdant Power

Si procede nel seguito ad una breve descrizione delle tipologie di sistemi considerate.

Le prestazioni dei sistemi saranno essenzialmente descritte dalla loro curva di potenza, ovvero dalla relazione della potenza erogata, P , con la velocità della corrente. Tale relazione è descrivibile in prima approssimazione da una legge cubica

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 S C_p$$

dove ρ è la densità media dell'acqua (assunta pari a circa 1025 kg/m^3) e S è una superficie di riferimento e C_p è definito coefficiente di potenza ed è una misura della efficienza di conversione dell'energia cinetica della corrente in energia meccanica [5].

Le curve di potenza adottate sono ottenute in base ai dati a disposizione sul coefficiente di potenza, utilizzando l'ipotesi che la curva di potenza possa essere descritta con sufficiente approssimazione da una curva cubica. Nella definizione del comportamento sono importanti anche i valori delle velocità di *cut-in*, V_{in} , (velocità a cui il sistema inizia a produrre potenza utile) e velocità di *cut-out*, V_{out} , velocità massima a cui il sistema è in grado di produrre potenza. Inoltre, va definita la velocità nominale, V_r , definita come la velocità a cui il sistema raggiunge la potenza massima. Le curve adottate in questo studio presumono che le velocità di cut-in siano pari a 0.5 m/s per tutti i sistemi, che la velocità di cut-out sia pari a 3.5 m/s ed assumono una velocità nominale pari circa 2 m/s (si veda par. 2.2). Uno studio di dettaglio sui singoli sistemi richiede naturalmente la definizione precisa di tali parametri. Tuttavia per una stima generale di produzione energetica, le porzioni di curva di potenza corrispondenti alle velocità molto alte e molto basse rispetto alla media del sito forniscono un contributo relativamente ridotto alla produzione complessiva ed una incertezza su di essi ha un effetto meno rilevante.

1.1. Sistema MCT SeaGen

Il sistema SeaGen [6] è costituito da una coppia di turbine idrauliche montate su una torre di supporto rigidamente ancorata al fondo del mare. Le turbine sono montate su un braccio che può essere sollevato fino alla superficie per scopi di manutenzione e immerso alla profondità di esercizio. Il sistema è stato installato in diversi siti di prova ed in diversi modelli e dimensioni. In particolare è presente sia un modello in cui è prevista una piattaforma affiorante, mentre per fondali più profondi è previsto un sistema completamente sommerso.



Figura 1. Sistema MCT SeaGen. (fonte [6])

Un sistema di prova è stato progettato e testato per una potenza massima di 1.2 MW ad una velocità di circa 2.4 m/s. Un prototipo è stato installato presso Strangford Lough in Irlanda del Nord. L'efficienza dichiarata è pari a circa il 48%.

Si assume un coefficiente di potenza medio pari a circa

$$C_{p \text{ SeaGen}} = 0.46$$

La turbina è dotata di un sistema di controllo dell'angolo di calettamento delle pale (*pitch control*), sia per rispondere alla rotazione di 180° delle correnti di maree che per ottimizzare il processo di conversione di energia e limitare i carichi.

La torre di supporto ha una altezza massima di 38 m. Tale caratteristica limita l'impiego a fondali non eccessivamente profondi. E' però disponibile una soluzione completamente immersa che estende l'utilizzo del sistema a fondali di maggiore profondità.

Sono disponibili diverse soluzioni di taglia. Nel corso del presente studio, si prenderà in esame una configurazione con due turbine con diametro pari a circa 11 m e con potenza massima di circa 280 kW a 2 m/s.

1.2. Sistema Kobold

Il sistema Kobold, progettato in collaborazione con il dipartimento di Progettazione Aeronautica dell'Università di Napoli [7] a partire dagli anni '90, è stato realizzato in prototipo dalla società "Ponte di Archimede".

Il sistema prevede una turbina ad asse verticale montata su un albero connesso ad un generatore elettrico installato a bordo di una boa galleggiante in grado di fornire le necessarie caratteristiche di tenuta al mare.

Il prototipo, con dimensioni

altezza della pala: $H=6$ m

raggio della turbina: $R=3$ m

è stato installato nello Stretto di Messina ed è ancora in funzione. Lo sviluppo del progetto prosegue con lo studio di possibilità di realizzare impianti di dimensioni maggiori.

Nel presente studio si fa riferimento ad un impianto con le seguenti dimensioni

altezza della pala: $H=6.2$ m

raggio della turbina: $R=3.1$ m

con potenza massima di circa 45 kW in corrispondenza di una corrente massima di 2.5 m/s.

Per la stima della produzione del sistema si adotta un coefficiente di potenza pari a

$$C_{pKobold}=0.30$$



Figura 2. Visione pittorica della installazione della turbina ad asse verticale Kobold.

1.3. Sistema GEM

Il sistema GEM, anche denominato “aquilone del mare”, consiste in una struttura galleggiante che supporta due turbine idrauliche, eventualmente intubate in alcune configurazioni, per incrementare l’efficienza della conversione energetica [8]. La struttura è collegata attraverso un cavo di ormeggio ad un ancoraggio al fondo marino, costituito anche da un semplice corpo morto. Il sistema può orientarsi autonomamente nella direzione della corrente, consentendo l’utilizzo del sistema anche in regimi di correnti alternanti.

Lo sviluppo del progetto ha raggiunto la fase prototipale. Un prototipo in scala reale è stato installato a scopo sperimentale nella laguna di Venezia nel periodo Aprile-Maggio 2012. Il prototipo realizzato è caratterizzato dalle seguenti dimensioni di massima:

raggio delle turbine: $R=1.54$ m

raggio del diffusore: 2.5 m

lunghezza totale: 9 m

larghezza totale: 9 m

altezza totale: 6 m

Il sistema considerato nelle stime di produzione condotte è caratterizzato dalle stesse dimensioni del prototipo. Il coefficiente di potenza adottato per il sistema dotato di diffusori, riferito alla superficie del disco della turbina è pari a

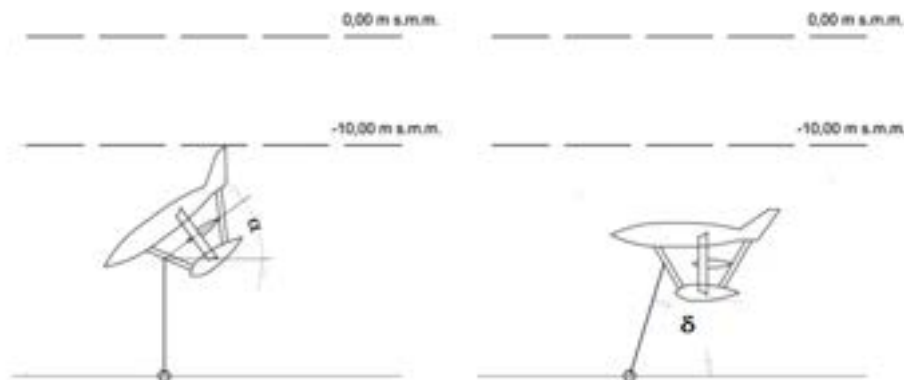
$$C_{P\text{ GEM}}=0.75$$

(Si nota un apparente incremento del coefficiente di potenza riferito all'area della turbina in presenza del diffusore. Tale incremento apparente di coefficiente di potenza è legato all'effetto dell'incremento di portata elaborata dalla turbina indotto dal diffusore [9] [10].)

Si riporta di seguito la curva di potenza del sistema GEM.



Figura 3. Prototipo del sistema GEM.



**Figura 4. Schema di funzionamento del GEM: senza corrente (sinistra), in corrente (destra).
(Gli angoli di assetto riportati sono amplificati per chiarezza grafica)**

1.4. Sistema Fri-El

Il sistema Fri-El, sviluppato dalla FRi-El SpA, con la collaborazione dell'università di Napoli [11], è costituito da una serie di turbine idrodinamiche ad asse orizzontale montate su un albero snodato, denominato filare, composto da una successione di tubi di opportuna lunghezza connessi tra loro mediante giunti cardanici. Ciascun filare è connesso ad una generatore installato su un pontone galleggiante: ciò fornisce il vantaggio di evitare parti elettriche immerse.

Una serie di prove sperimentali, prima nella vasca navale dell'università di Napoli, poi in mare nello Stretto di Messina, si sono svolte negli anni dal 2007 al 2009. In particolare si sono svolte prove sperimentali su due

prototipi da 6 e da 20 kW. E', inoltre, in fase di sviluppo un prototipo da 500 kW da installare nello stretto di Messina.

Diverse configurazioni sono possibili e la modularità è un aspetto fondamentale del sistema. L'ultimo prototipo prevede due filari con assi non paralleli ma formanti un angolo relativo, allo scopo di ridurre l'interferenza di scia tra una turbina e le turbine seguenti.

Il coefficiente di potenza stimato da prove sperimentali è pari a

$$CP=0.316$$

per ciascun filare di turbine. Tale valore è riferito alla superficie complessiva delle turbine del filare.

Il valore del coefficiente di potenza, relativamente più basso rispetto ai valori tipici di turbine ad asse orizzontale, può essere imputato agli effetti della interferenza di scia tra le turbine parzialmente allineate di ciascun filare.

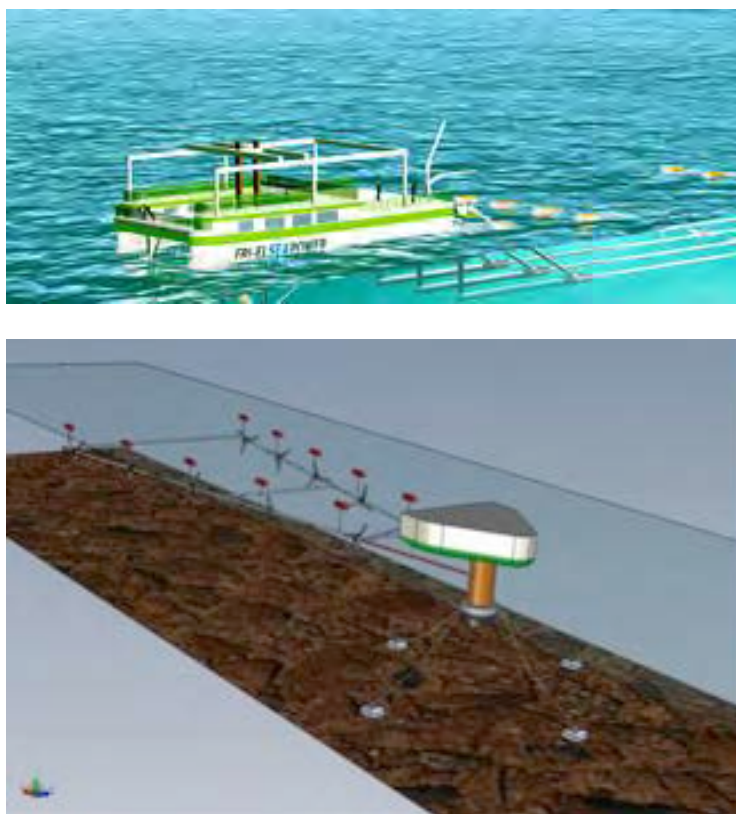


Figura 5. Sistema Fri-El a filari.

Per rispondere alla rotazione della corrente, il sistema prevedrebbe una rotazione completa intorno al pontone di supporto dei generatori. Tale rotazione si presenta come un'operazione di notevole complessità per la lunghezza del sistema completo e per la presenza degli snodi negli alberi. Inoltre, le dimensioni del sistema possono richiedere zone molto ampie di manovra, riducendo le possibili zone di installazione per problemi di interferenza con le attività di navigazione.

In un diverso approccio al problema dell'inversione della corrente, le turbine potrebbero essere dotate di opportuni sistemi di controllo per adattarsi alle diverse direzioni di provenienza. In tal caso si potrebbe forse rimuovere la necessità di rotazione dell'intero sistema e l'ingombro operativo effettivo potrebbe abbassarsi notevolmente.

Nel caso in esame si prenderanno in considerazione le seguenti dimensioni caratteristiche del sistema:

numero di filari: 4

numero di turbine per filare: 3

1.5. Sistema Verdant Power

Il sistema *Verdant Power Free Flow* è costituito essenzialmente da una singola turbina tripala ad asse orizzontale installata su una torre di supporto carenata e fissata al fondale.

Il sistema è completamente sommerso, riducendo l'impatto visivo e l'interferenza con altre attività.

La turbina è regolata a stallo ed è montata su una navicella in configurazione *downstream*. L'unità di produzione è fornita di un sistema di rotazione di imbardata che consente l'allineamento passivo alla corrente, consentendone il funzionamento in diverse direzioni di flusso.

Un impianto sperimentale composto da 5 turbine da circa 20 kW ciascuna, del diametro di 5 m, è stato installato in prossimità della Roosevelt Island (New York) nell'ambito del progetto RITE (*Roosevelt Island Tidal Energy*), per un periodo iniziale di prova, che ha consentito la raccolta di dati di prestazione [12], e che sarà seguito dallo sviluppo commerciale del progetto. Il progetto prevede, infatti, l'ulteriore estensione dell'impianto fino ad 1 MW di potenza installata.

Per il presente sistema si assume il seguente coefficiente di potenza:

$$C_p=0.336$$

ricavato dalla letteratura correlata al progetto.



Figura 6. turbina marina *Verdant Power, Free flow*

Si nota che essendo il sistema controllato a stallo potrebbero verificarsi perdite addizionali alle velocità elevate della corrente, non prese in considerazione nella presente analisi.

2. Stima delle curve di potenza

2.1. Efficienza del generatore

I valori delle efficienze di conversione riportati nelle considerazioni precedenti sono relativi essenzialmente alle efficienze di conversione della energia cinetica della corrente in energia meccanica, rappresentati attraverso il coefficiente di potenza, C_p . Si assume, inoltre, che il sistema di conversione elettrica (generatore, sistemi di conversione e trasmissione dell'energia) sia caratterizzato da un rendimento pari a

$$\eta_{el} = 0.9$$

Analogamente, si assume un rendimento meccanico degli organi di trasmissione pari a

$$\eta_{mec} = 0.9$$

Infine, si assume un rendimento organico complessivo pari

$$\eta \approx 0.8$$

Stime più precise di tali parametri sono possibili solo con una valutazione diretta dei sistemi nelle particolari installazioni. Le curve di potenza riportate in precedenza tengono già conto delle riduzioni dovute a tali fattori di efficienza.

2.2. Adattamento delle curve di potenza al sito in esame

Le curve di potenza riportate si riferiscono ad un insieme di impianti specifici con una assegnata velocità nominale. Con velocità nominale si intende la velocità della corrente in corrispondenza della quale si raggiunge la potenza massima. In letteratura [1], sono presenti indicazioni sulla scelta della velocità nominale dell'impianto. In particolare viene di solito suggerito un valore della velocità nominale pari ad una assegnata frazione della velocità di picco media nel sito, V_{msp} (*mean spring peak velocity*). Nel nostro caso una stima della velocità di picco media è stata ottenuta come media delle velocità di picco in 12 mesi lunari

$$V_{msp} = 2.84 \text{ m/s}$$

La letteratura citata fornisce un valore indicativo della velocità nominale, V_r , pari a

$$V_r = 0.71 * V_{msp} = 2.02 \text{ m/s}$$

Le curve di potenza utilizzate nelle stime di produzione sono state dunque limitate ad una potenza massima corrispondente alla velocità nominale di 2 m/s.

2.3. Curve di potenza assunte

Allo scopo di effettuare stime confrontabili e di avere ingombri paragonabili dei diversi sistemi, si assume che le singole unità installate abbiano tutte la stessa potenza massima pari a circa 1 MW.

Le dimensioni delle strutture sono in prima approssimazione scalate proporzionalmente ai diametri delle turbine. Si nota che le reali dimensioni potrebbero influenzare le possibilità di disposizione relativa delle unità di produzione e modificare le densità possibili di installazione e quindi le producibilità complessive in un dato sito. I dettagli realizzativi e le conseguenze sulla realizzabilità delle singole installazioni sono stati ritenuti trascurabili nella presente stima generale di produzione.

Si riportano di seguito le curve di potenza assunte per ciascun sistema di conversione dell'energia delle correnti.

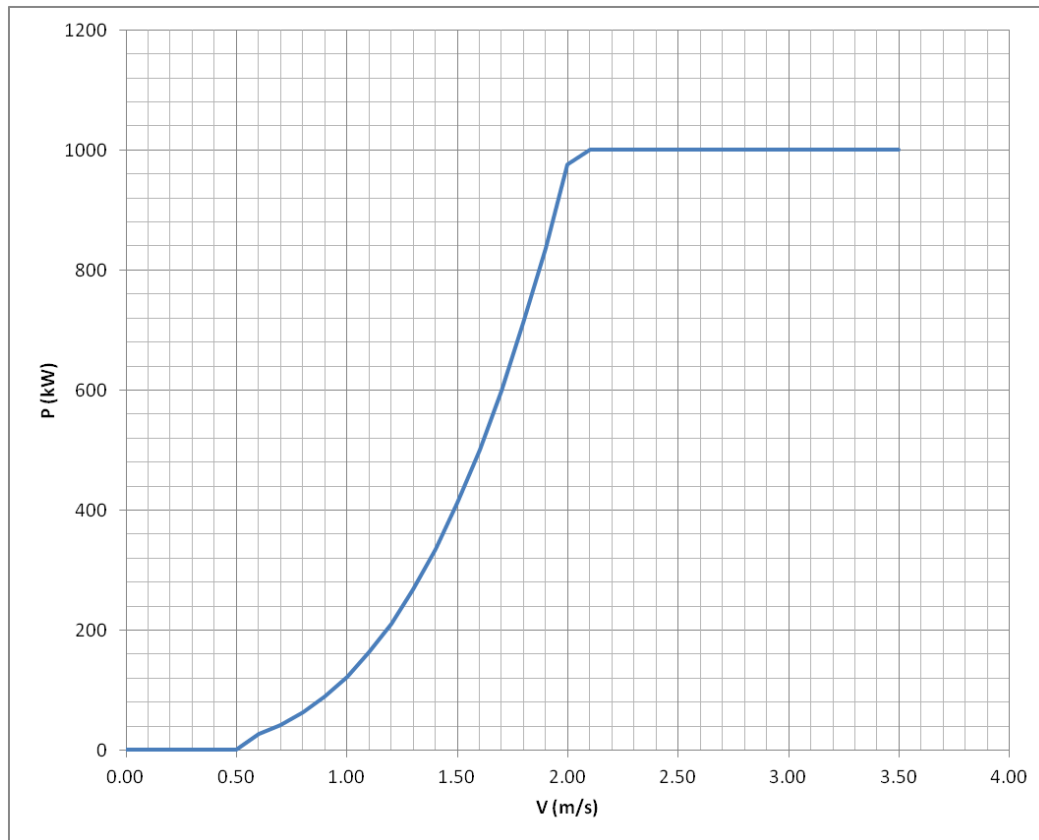


Figura 7. Curva di Potenza assunta per il sistema MCT SeaGen (due turbine ad asse orizzontale). In base alle assunzioni fatte, le rimanenti curve di potenza risultano avere un andamento simile.

3. Confronto dei sistemi di conversione

Si procede ad un breve confronto tra i diversi sistemi di conversione considerati. In particolare, si valuteranno brevemente, per le diverse tecnologie considerate, gli aspetti relativi alla efficienza del sistema, alle difficoltà di installazione, all'impatto sull'ambiente marino.

3.1. Efficienza di conversione

I sistemi di produzione di energia dalle correnti presi in esame sono caratterizzati da una efficienza di conversione caratteristica dipendente dalla tecnologia impiegata. In particolare, le turbine ad asse orizzontale presentano in genere una maggiore efficienza di conversione rispetto a quelle ad asse verticale, rappresentata da un maggiore coefficiente di potenza ($C_{Pmax}=0.3 \div 0.35$ per le turbine ad asse verticale, $C_{Pmax}=0.4 \div 0.45$ per le turbine ad asse orizzontale). D'altro canto, le turbine ad asse verticale posseggono l'importante caratteristica di essere insensibili alla direzione provenienza del flusso, riducendo i problemi connessi con l'eventuale necessità di orientare il sistema al variare della direzione di provenienza della corrente, come spesso accade nel caso delle correnti di marea. Gli impianti dotati di turbine ad asse orizzontale devono prevedere opportuni sistemi di controllo dell'orientazione che ne aumentano leggermente la complessità costruttiva ed operativa.

L'utilizzo di un diffusore, che agisce essenzialmente come convogliatore di flusso incrementando la portata di massa fluida elaborata dalla turbina, può ulteriormente incrementare l'efficienza apparente di conversione. Va però considerato che l'ingombro frontale di una turbina dotata di diffusore è significativamente aumentato dalla presenza dello stesso diffusore: l'apparente significativo incremento del coefficiente di potenza (dipendente dal rapporto tra l'area di uscita del diffusore e l'area della sezione di posizionamento della turbina con valori del C_{Pmax} che possono raggiungere 0.8) è connesso alla scelta

dell'area della turbina come area di riferimento per la definizione del C_p [9]; prendendo come valore di riferimento l'area dell'effettivo ingombro frontale (area di uscita del diffusore) i valori del coefficiente di potenza si allineano alla media delle turbine ad asse orizzontale. Va comunque notato che la letteratura sulle turbine intubate riferisce della possibilità di un incremento addizionale dell'efficienza rispetto ad una turbina semplice maggiorata, a parità di ingombro frontale: tale incremento sarebbe connesso ad una depressione addizionale creata a valle del diffusore, che contribuisce ad un ulteriore incremento della portata di massa elaborata [9] [10].

Nel caso di installazioni con turbine multiple, il rendimento di conversione può essere anche significativamente influenzato dalle interazioni tra i campi fluidodinamici generati dalle diverse unità e, dunque, dalla distanza relativa tra esse, sia in senso longitudinale che trasversale alla direzione della corrente. In particolare, ciò può accadere nel caso di turbine installate in linea (sistema Fri-El), nel qual caso, in sede di progettazione, vanno opportunamente definiti le disposizioni delle turbine ed il loro allineamento relativo allo scopo di ridurre l'interferenza di scia.

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva delle efficienze delle turbine prese in esame

Tabella 2. Comparazione delle efficienze dei sistemi considerati: confronto dei coefficienti di potenza.

sistema	Coefficiente di potenza massimo CP_{max}
MCT SeaGen	0.46
Kobold	0.30
GEM	0.75
Fri-el	0.32
Verdant Power	0.34

3.2. Caratteristiche tecniche e problematiche di installazione

Ciascuno dei sistemi considerati presenta delle caratteristiche peculiari connesse con le particolari soluzioni tecniche adottate.

Tutti i sistemi presentano, sotto aspetti diversi, il problema dell'ancoraggio al fondale. In alcuni casi si ha bisogno di un ancoraggio fisso (SeaGen, Verdant Power,...) che presenta problemi connessi agli elevati costi di installazione di fondazioni fisse sottomarine. Tali problemi crescono al crescere della profondità del fondale nel sito di installazione. Altri sistemi cercano di ridurre tale problematica (GEM, Kobold, Fri-el) affidandosi a soluzioni con strutture di supporto galleggianti con collegamento non rigido al fondo (ancoraggi ed ormeggi). Tale soluzione può presentarsi di più facile installazione, anche se vanno tenute in debito conto le caratteristiche locali del fondale che potrebbero presentare condizioni poco favorevoli all'ancoraggio, in relazione alla batimetria e alle composizione del fondo. La scelta dell'ancoraggio è comunque di fondamentale importanza e l'eventuale necessità di ancoraggi particolari può incidere negativamente sui costi di installazione e su quelli di manutenzione.

3.3. Impatto sull'ambiente marino

Dato il numero relativamente ridotto di installazioni non sono disponibili molte informazioni sui possibili effetti dell'installazione intensiva di impianti di generazione dalle correnti di marea.

Dal punto di vista dell'impatto visivo alcuni sistemi presentano il vantaggio di essere sommersi (GEM e SeaGen in alcune versioni oppure Verdant Power) rispetto agli altri sistemi che presentano parti emerse. La presenza di parti emerse presenta l'ulteriore problema della maggiore possibilità di interferenza con la navigazione di superficie.

Alcuni sistemi (Fri-El, GEM) presentano la necessità di orientarsi al variare della direzione della corrente. Nel caso del sistema a pontone galleggiante Fri-El, la rotazione dell'intero sistema può presentare notevoli difficoltà e produrre un impatto significativo sulle operazioni navali occupando aree operative più ampie.

In relazione alle emissioni acustiche, il ridotto numero di giri di rotazione e la connessa ridotta intensità di emissione dovrebbero produrre limitati effetti sulla fauna marina, anche se in tal senso andrebbero condotti studi più approfonditi. Anche in relazione alle emissioni elettromagnetiche, una opportuna schermatura dovrebbe essere in grado di limitare eventuali inconvenienti, ma anche in tal caso uno studio diretto degli eventuali effetti sulla biosfera marina risolverebbe i possibili dubbi sugli eventuali rischi ambientali.

3.4. Tabella riepilogativa di confronto

Si riporta di seguito una tabella di confronto delle diverse tecnologie considerate, in base a diversi aspetti di interesse.

Tabella 3. Caratteristiche tecniche ed operative

Sistema	Presenza di parti in superficie	Possibilità di variazione della profondità operativa	Tipo di ancoraggio	Possibilità di imbardata per allineamento alla corrente	Facilità di manutenzione
MCT Seagen	Sì (anche se esiste una possibile versione senza piattaforma di superficie)	Sì	Fisso al fondo marino con fondazioni sottomarine e torre di sostegno	No (anche se in alcune soluzioni è possibile variare l'angolo di calettamento delle pale)	Media per il sistema con piattaforma in superficie (possibilità di sollevare le turbine)
Kobold	Sì	No	Galleggiante ormeggiato, con boa di sostegno in superficie	Non necessaria (turbina ad asse verticale)	Media (Parti elettriche emerse)
GEM	No	Sì	Galleggiante con ormeggio flessibile al fondo (Ancoraggio e cavo di ormeggio)	Sì	Buona (possibilità di emersione con controllo della lunghezza del cavo di ormeggio ed eventuale rimozione e spostamento in cantiere)
Fri-El	Sì	No	Galleggiante ormeggiato, con pontone di sostegno della parte elettrica in superficie	Sì (anche se la rotazione può risultare difficoltosa per sistemi snodati di grandi dimensioni)	Media (parti elettriche su pontone emerso)
Verdant Power	No	No	Struttura di supporto fissa posata sul fondo con palo di sostegno e navicella rotante	Sì	Bassa (Complessità delle operazioni di intervento sottomarino)

Tabella 4. Occupazione delle aree, impatto ed interferenza con altre attività.

Sistema	Ingombro operativo e densità di installazione	Impatto visivo	Interferenza con attività marine (navigazione, pesca)
MCT Seagen	Alta	Sì (presenza della piattaforma)	Sì
Kobold	Media	Sì	Sì
GEM	Alta	No	No (tranne nelle fasi di manutenzione in emersione)
Fri-El	Bassa	Sì	Sì
Verdant Power	Media	No	No (anche se, su fondali bassi può interferire con l'uso di reti profonde)

In base alle caratteristiche tecniche dei diversi sistemi è possibile indicare i livelli di costo attesi per ciascun sistema nelle fasi di installazione funzionamento.

Tabella 5. Indicazioni sui costi attesi.

Sistema	Costo di installazione	Costo di manutenzione ordinaria	Costo di manutenzione straordinaria
MCT Seagen	Alto (fondazioni sottomarine)	Medio basso	Medio (struttura sommersa di difficile rimozione)
Kobold	Medio Basso (tranne che per fondali molto profondi)	Basso	Basso (Possibilità di trasporto in cantiere)
GEM	Medio Basso (tranne che per fondali molto profondi)	Basso	Basso (Possibilità di trasporto in cantiere)
Fri-El	Medio Basso (tranne che per fondali molto profondi)	Basso	Basso (Possibilità di trasporto in cantiere)
Verdant Power	Medio alto (installazione fissa su appoggio tripode)	Medio	Medio Alto (struttura sommersa)

4. Valutazione della produzione energetica

4.1. Stime di produzione

La stima della produzione energetica sarà basata su un semplice modello di valutazione che utilizza il profilo temporale della velocità e la curva di potenza del sistema in esame. Avendo a disposizione la storia temporale delle velocità in un sito, ed assumendo un comportamento quasi stazionario del sistema di conversione, è infatti possibile stimare l'energia per semplice integrazione diretta nel tempo della potenza erogata

$$E_a = \int_{T_i}^{T_f} P V(t) dt$$

indicando con E_a l'energia prodotta nell'intervallo di tempo di interesse, ad esempio un anno, $P(V)$ è la curva di potenza del sistema in esame, potenza erogata in funzione della velocità della corrente, e $V(t)$ è la velocità della corrente nel sito di interesse.

La metodologia seguita consiste essenzialmente nel definire le potenzialità produttive di un sito occupato da una fattoria di assegnate dimensioni formata da diverse unità dello stesso tipo (metodo delle *farm*), con una densità di occupazione dell'area assegnata valutata in base agli ingombri funzionali caratteristici del sistema in esame.

E' possibile effettuare una stima di massima del flusso di energia disponibile in una sezione dell'intera area dello stretto, fornita solo come valore indicativo di riferimento.

Le stime di produzione effettuate, oltre alle incertezze connesse con la misura delle velocità e della potenza erogata dai sistemi di conversione, risentono della incertezza connessa con la variabilità delle storie temporali di velocità tra diversi periodi di osservazione. E' da notare però che rispetto a stime connesse con altre fonti rinnovabili, come la velocità del vento, le stime di produzione da correnti marine sono caratterizzate da una minore incertezza, connessa alla carattere tipico delle correnti di marea che per loro natura sono contraddistinte da una maggiore ripetitività. Le stime di produzione basate su un solo anno di dati danno quindi una significativa indicazione del potenziale produttivo di un sito.

Per la stima della potenza erogata si procederà assumendo delle curve di potenza assegnate per ciascun sistema di conversione. Sulla base delle curve di potenza assunte si potrà determinare la curva di potenza complessiva dell'impianto in esame, una volta assunto il numero di unità componenti l'impianto. Per la determinazione del numero di unità installabili in un'area di date dimensioni, si dovrà tenere conto delle dimensioni dell'unità componente l'impianto e delle distanze operative da imporre tra le diverse unità dello stesso impianto. Tali distanze tengono conto di necessità di sicurezza di funzionamento (eventuale pericolo di collisioni) e di necessità operative come la riduzione delle interazioni tra le diverse unità che possono peggiorare l'efficienza di conversione del sistema complessivo, come ad esempio le interazione di scia tra diverse turbine, che impongono una restrizione alla distanza longitudinale tra le turbine, per consentire il recupero almeno parziale della velocità asintotica della corrente, ed alla distanza trasversale per mitigare le eventuali interferenze.

Si nota che le informazioni utilizzate in relazione ai sistemi di conversione considerati si limitano volutamente a informazioni disponibili nel pubblico dominio o informazioni relative a impianti di prova noti, e come tali risentono di incertezze e approssimazioni connesse con la mancanza di verifiche affidabili di sufficiente estensione.

Inoltre, si nota che i sistemi considerati sono caratterizzati da una notevole differenza in termini di dimensioni, potenze massime e costi di installazione e manutenzione. La varietà dei sistemi, pur consentendo in principio di valutare un ampio spettro di possibili installazioni, comporta una maggiore difficoltà di confronto tra i risultati delle stime di produzione per le possibili fattorie considerate; le stime saranno infatti relative a sistemi con superfici occupate diverse, con una diversa densità di unità installate e con una diversa potenza installata.

4.2. Distanze assunte tra le unità di produzione

Si assumeranno le seguenti distanze caratteristiche tra le unità di conversione energetica installate in ciascun potenziale sito di interesse. Nella scelta delle distanze tra i sistemi di produzione esaminati si deve

tenere conto, oltre che delle possibili interferenze fluidodinamiche, anche delle reali necessità operative dei sistemi. Ad esempio, il sistema GEM, connesso al fondo con ormeggio e quindi non rigidamente, potrebbe necessitare di una spaziatura più ampia, connessa con la possibilità di rotazione ed allineamento con la corrente. Inoltre, bisogna tenere conto delle necessità connesse all'eventuale passaggio di imbarcazioni. Un ulteriore vincolo alla possibilità di installazione è inoltre imposto dalle caratteristiche del fondale e dalla batimetria locale.

Nel caso allo studio, le distanze tra le unità di produzione saranno definite solo in funzione delle dimensioni delle unità di produzione ed in particolare in relazione ai diametri delle turbine installate o ad altre dimensioni caratteristiche.

Si presentano delle stime di massima assunte per i singoli sistemi.

Tabella 6. Dimensioni caratteristiche per il sistema MCT SeaGen (asse orizzontale)

Raggio turbina:	$R=10.15\text{ m}$
Diametro turbina:	$D=20.3\text{ m}$
Superficie frontale:	$S=647\text{ m}^2$ (due turbine)
Ingombro laterale geometrico:	$\Delta W_g = \text{Lat. Size}=3D=60.9\text{ m}$ (2 turbine + supporto, dimensioni stimate)
Ingombro longitudinale geometrico:	$\Delta L_g = \text{Front Size}=2*R=20.3\text{ m}$
Distanza di sicurezza laterale:	$\Delta L_c = \text{Lat Clearance}=2.5*D=50.75\text{ m}$
Distanza di sicurezza longitudinale:	$\Delta W_c = \text{Front Clearance}=10*D=203\text{ m}$

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema SeaGen produrrebbe una potenza massima di 1000.8 kW alla velocità di 2.0 m/s.

Tabella 7. Dimensioni caratteristiche per il sistema Kobold (asse verticale)

Raggio della pala	$R=15.75\text{ m}$
Diametro turbina:	$D=31.5\text{ m}$
Altezza della pala	$H=33\text{ m}$
Superficie frontale:	$S=(2*R)*H=992\text{ m}^2$
Ingombro laterale geometrico:	$\Delta W_g = \text{Lat. Size}=2.5*R=39.375\text{ m}$
Ingombro longitudinale geometrico:	$\Delta L_g = \text{Front Size}=2.5*R=39.375\text{ m}$
Distanza laterale:	$\Delta L_c = \text{Lat. Clearance}=2.5*D=78.75\text{ m}$
Distanza longitudinale:	$\Delta W_c = \text{Front Clearance}=10*D=315\text{ m}$

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema Kobold produrrebbe una potenza massima di 1000.6 kW alla velocità di circa 2.02 m/s.

Tabella 8. Dimensioni caratteristiche per il sistema GEM (asse orizzontale)

Raggio turbina:	$R=7.95\text{ m}$
Diametro turbina:	$D=15.9\text{ m}$
Superficie frontale:	$S=397\text{ m}^2$ (due turbine)
Ingombro laterale geometrico:	$\Delta W_g = \text{Lateral Size}=2.5*D_{\text{shroud}}=52.35\text{ m}$
Ingombro longitudinale	$\Delta L_g = \text{Front Size}= \text{Lat. Size}=52.35\text{ m}$

geometrico:	
Distanza laterale:	$\Delta L_c = \text{Lateral Clearance} = 2.5 * D_{\text{shroud}} = 25.35 \text{ m}$
Distanza longitudinale:	$\Delta W_c = \text{Front Clearance} = 10 * D_{\text{shroud}} = 209 \text{ m}$

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema GEM produrrebbe una potenza massima di 1001.1 kW alla velocità di 2.02 m/s.

Nel caso del sistema GEM, sistema con turbine dotate di diffusori (denominati anche *shroud*), viene preso come riferimento dimensionale il diametro dei diffusori D_{shroud} .

Tabella 9. Dimensioni caratteristiche per il sistema Fri-El (asse orizzontale) rotazione del sistema complessivo

Numero filari:	$N_{\text{fil}}=4$
Numero turbine per filare:	$N_{\text{turb}}=3$
Raggio turbina:	$R=5 \text{ m}$
Diametro turbina:	$D=10 \text{ m}$
Superficie frontale:	$S=942 \text{ m}^2$ (tre turbine per due filari)
larghezza min filari:	$W_{\text{min}}=95 \text{ m}$
larghezza max filari:	$W_{\text{max}}=150 \text{ m}$
distanza turbina-turbina su un filare:	$\text{dist}_{\text{turb}}=75.8 \text{ m}$
lunghezza palo inclinato:	$L_{\text{incl}}=22.9 \text{ m}$
Lunghezza totale:	$L_{\text{tot}}=250.4 \text{ m}$
Ingombro laterale geometrico:	$\Delta W_g = \text{Lateral Size} = W_{\text{max}} = 150 \text{ m}$
Ingombro longitudinale geometrico:	$\Delta L_g = \text{Front Size} = 1.5 * L_{\text{tot}} = 375.6 \text{ m}$
Distanza laterale:	$\Delta L_c = \text{Lateral Clearance} = 2.5 * L_{\text{tot}} = 626 \text{ m}$
Distanza longitudinale:	$\Delta W_c = \text{Front Clearance} = 2.5 * L_{\text{tot}} = 626 \text{ m}$

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema Fri-El produrrebbe una potenza massima di 1001.1 kW alla velocità di 2.02 m/s.

NOTA: nel caso del sistema Fri-el le distanze di tolleranza sono stimate nell'ipotesi di rotazione totale del sistema, si assume in tal caso che la manovra di rotazione possa interessare una regione circolare di diametro pari 2.5 volte la lunghezza totale del sistema. Nel caso si adottasse un opportuno sistema di controllo che evitasse la rotazione completa, gli ingombri operativi potrebbero essere ridotti. Si riporta di seguito una stima degli ingombri nell'ipotesi di sistema non rotante.

Tabella 10. Dimensioni caratteristiche per il sistema Verdant Power (asse orizzontale)

Raggio turbina:	$R=16.8 \text{ m}$
Diametro turbina:	$D=33.6 \text{ m}$
Superficie frontale:	$S=887 \text{ m}^2$ (due turbine)
Ingombro laterale geometrico:	$\Delta W_g = \text{Lateral Size} = 2.5 * D = 84 \text{ m}$
Ingombro longitudinale geometrico:	$\Delta L_g = \text{Front Size} = D = 34 \text{ m}$
Distanza laterale:	$\Delta L_c = \text{Lateral Clearance} = 2.5 * D = 84 \text{ m}$
Distanza longitudinale:	$\Delta W_c = \text{Front Clearance} = 10 * D = 336 \text{ m}$

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema Verdant Power produrrebbe una potenza massima di 1001.4 kW alla velocità di 2.02 m/s.

Nelle tabelle precedenti ΔW_g e ΔL_g rappresentano gli ingombri geometrici della singola unità, mentre ΔL_c e ΔW_c rappresentano le distanze operative tra le unità.

Le curve di potenza assunte sono tutte di tipo cubico con dal cut-in fissato a 0.5 m/s fino al cut-out fissato a 3.5 m/s. Le curve sono ipotetiche e assumono che si impieghino unità della stessa potenza massima indipendentemente dal tipo di sistema. (Le leggere differenze tra le potenze massime sono legate alle approssimazioni sulle dimensioni).

Sulla base delle stime di ingombro riportate in precedenza, si ottiene una stima delle possibili densità di occupazione delle aree di installazione.

In particolare nella tabella seguente sono riportati i valori tipici della densità di unità installate per ciascun tipo di sistema della taglia assegnata di 1 MW.

Tabella 11. Densità di installazione per i sistemi considerati di taglia 1 MW.

Sistema	Densità installazione
SeaGen	40 unità/km ²
Kobold	23 unità/km ²
GEM	36 unità/km ²
Fri-el	2.5 unità/km ²
Verdant Power	16 unità/km ²

Le densità stimate non tengono conto di eventuali problemi pratici di installazione connessi con eventuali necessità operative (ad esempio, passaggio di imbarcazioni, etc) o con difficoltà di installazione legate alla batimetria locale.

5. Distanza longitudinale ed effetti di scia (effetto schiera)

Si nota che la distanza longitudinale tra le unità di produzione è stata assunta pari a circa 10 volte il diametro della turbina relativa al sistema in esame. Tale valore è stato scelto per consentire un sufficiente recupero della velocità della corrente. Si assumerà che con tale distanza relativa, le turbine successive alla prima fila, in una ipotetica installazione su più file, possano essere considerate operare alla stessa velocità della corrente indisturbata.

In realtà, anche a tale distanza alcuni modelli di scia prevedono una riduzione della velocità effettivamente percepita dalla turbina.

Un modello estremamente semplificato [13], ma applicato con relativo successo in campo eolico ed esteso alle applicazioni marine, assume una legge lineare di variazione del diametro di scia ed ottiene una legge di variazione della velocità in scia a partire dall'espressione del bilancio della quantità di moto:

$$U_x = U_0 - U_{w0} \frac{D}{D+2kx}$$

dove x è la distanza a valle della turbina, D è il diametro della turbina, U_0 rappresenta la velocità indisturbata, U_{w0} la velocità nella scia immediatamente a valle della turbina (tale velocità è in genere assunta pari alla velocità raggiunta a valle della turbina in fluido ideale secondo la teoria di Betz ed è pari a $2/3$ di U_0 nelle condizioni di coefficiente di ottimo). Il coefficiente " k " rappresenta il rateo di crescita della sezione di scia e si assume in genere che possa variare nel campo $0.05 \div 0.1$.

Nel presente studio si assume un valore del coefficiente di espansione di scia, k , (*wake decay constant*) pari a

$$k=0.075.$$

Si assume, inoltre, per U_{w0} l'espressione fornita dalla teoria di Betz

$$U_{w0} = U_0 \sqrt{1 - C_T}$$

dove C_T è il coefficiente di spinta, definito come

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 A}$$

essendo T la spinta sulla turbina e A l'area del disco.

Il valore del C_T nelle condizioni di funzionamento ottimo della turbina nella teoria di Betz risulta pari a

$$C_T = 0.89$$

Assumendo tale valore per il coefficiente di spinta, si ha il seguente andamento della velocità in scia

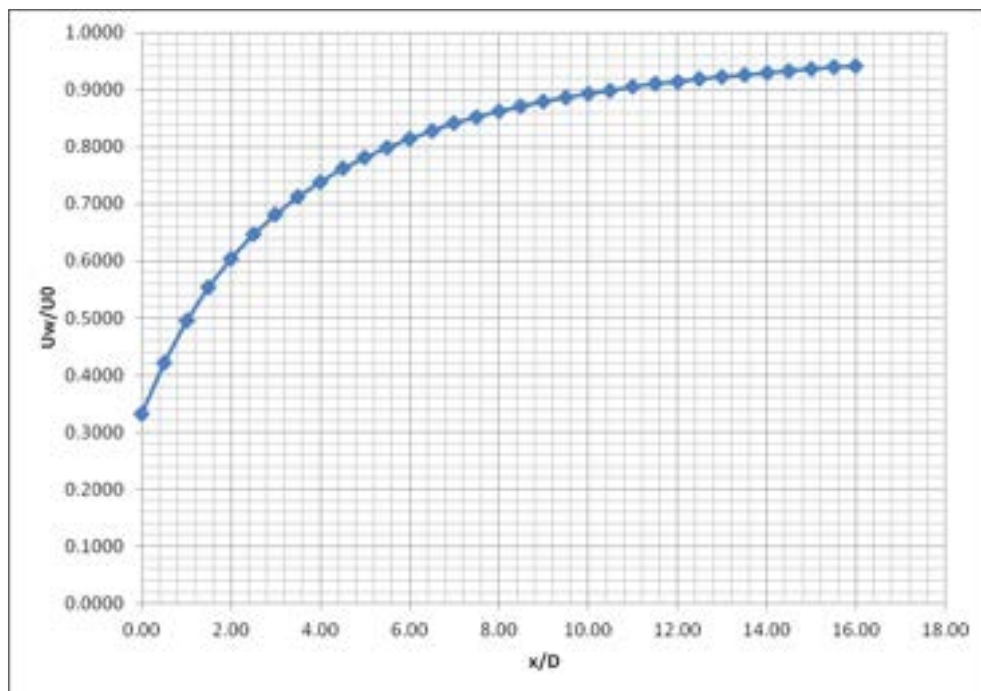


Figura 8. Andamento della velocità nella scia di una turbina secondo il modello semplificato di Jensen, in funzione della distanza a valle della turbina adimensionalizzata rispetto al diametro. $C_T=0.89$, $k=0.075$

Si nota che in corrispondenza di $x/D=10$, si ha un rapporto di velocità in scia pari a

$$U_w/U_0 = 0.893$$

¹ Tale espressione è valida nel caso di valore del $C_T < 1$. Tale condizione potrebbe non essere soddisfatta in particolare nel caso di presenza di diffusore come per il sistema GEM. Si utilizzerà comunque, in prima approssimazione, tale valore per tutti i sistemi considerati.

Variando la potenza erogata con il cubo della velocità, si ha una riduzione della potenza erogata e di conseguenza della energia estraibile pari a

$$\eta_{wake}=0.712$$

Si terrà conto nel seguito degli effetti di interazione di scia attraverso questo fattore di riduzione.

Si nota che tale stima delle perdite di scia risulta affetta da alcune approssimazioni. In particolare, solo le turbine successive alla prima schiera sono effettivamente affette da tali perdite; inoltre, non si tiene conto delle interazioni tra scie multiple provenienti da turbine diverse, né del fatto che una turbina può essere solo parzialmente investita dalla scia di una turbina precedente.

6. Stima della velocità della corrente

6.1. Dati delle tabelle di marea

Le stime di produzione sono basate sui rilievi di velocità in alcuni punti di misura, nel sito di indagine prescelto. I dati fondamentali per l'analisi di produzione sono basati sulle tavole di Marea dello Stretto di Messina, relative all'anno 2004 (fonte: Istituto Idrografico della Marina [14]). Tali dati forniscono informazioni relative alle ore di picco e calma delle correnti nelle due direzioni di flusso (montante e scendente) e riportano i valori attesi delle velocità di picco nei periodi esaminati.

In particolare, le tavole di marea riportano le velocità attese giorno per giorno in ciascun mese dell'anno, indicando la successione delle ore di calma e le velocità di picco nei due versi di flusso della corrente. Si osservano, infatti, nello Stretto di Messina due direzioni di flusso delle correnti di marea, dal Tirreno allo Ionio (convenzionalmente indicata come corrente "scendente" o "uscente", con segno negativo) ed, all'inverso, dallo Ionio al Tirreno (corrente "montante" o "entrante", con segno positivo).

Le tavole indicano i valori di velocità in uno specifico sito di riferimento dello stretto. In particolare, viene presa come riferimento la località "Punta Pezzo", di coordinate geografiche:

lat: 38° 14' 00" N

long: 15° 38' 00" E

ovvero in coordinate UTM

Zona: 33 S

Nord: 4231894.0 m

Est: 555429.1 m

Si riporta di seguito la batimetria della sezione dello stretto di Messina alla latitudine dello del sito di riferimento Punta Pezzo, con una profondità massima al centro dello Stretto di circa 185 m.

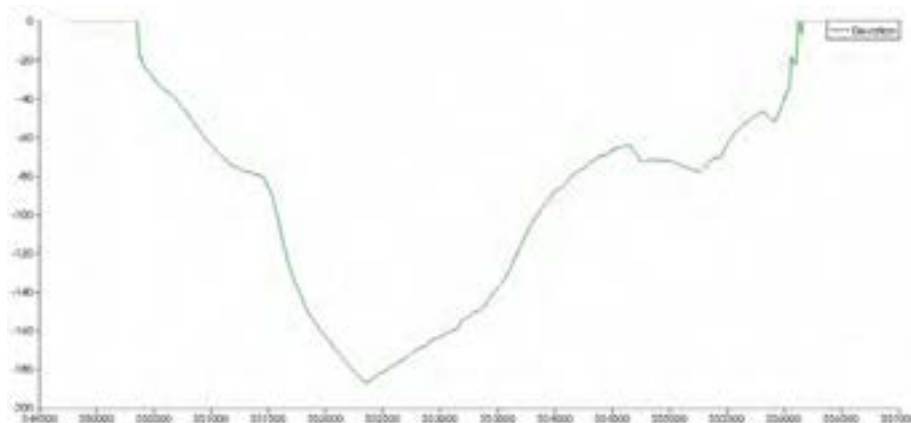


Figura 9. Batimetria dello stretto di Messina alla latitudine del sito di riferimento Punta Pezzo.

L'area complessiva della sezione dello stretto alla latitudine della località di riferimento ammonta a

$$A_{\text{sezione complessiva}} = 575000 \text{ m}^2$$

Si riporta, inoltre, a scopo illustrativo la batimetria complessiva dello stretto con indicazione delle curve isobatimetriche fino alla profondità di 500 m.

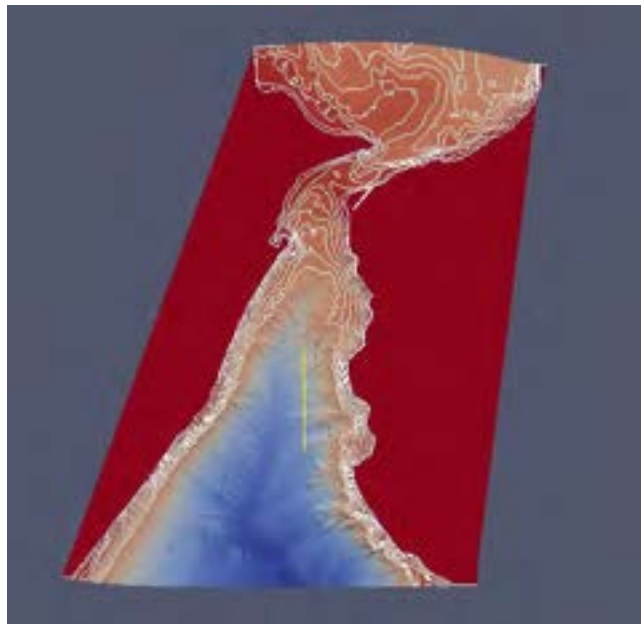


Figura 10. Batimetria dello stretto di Messina con indicazione delle curve isobatimetriche fino a 500 m.

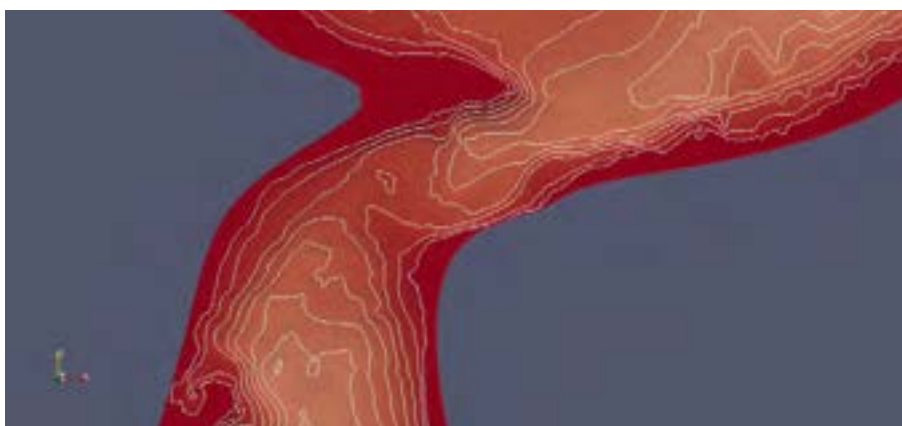


Figura 11. Batimetria dello stretto di Messina con indicazione delle curve isobatimetriche fino a 500 m – dettaglio

Si riportano di seguito, a titolo esemplificativo, le tabelle di velocità delle correnti di marea nel mese di Gennaio 2004, con l'indicazione delle ore di calma.

Le previsioni delle variazioni temporali di velocità della corrente sono basate sul metodo delle costanti armoniche per l'analisi delle maree. Si nota che le velocità riportate comprendono, oltre ai termini periodici, un termine costante di velocità permanente osservato nello stretto e pari a -0.70 nodi=-0.36 m/s (corrente permanente discendente).

Tabella 12. Tabella delle velocità della corrente nella località Punta Pezzo, mese di Gennaio 2004.

GENNAIO 2004

		max corrente				max corrente				max corrente		
	Stanca	Ora	Vel. (kts)	Stanc a	Ora	Vel. (kts)	Stanca	Ora	Vel. (kts)	Stanca	Ora	Vel. (kts)
1	2.50	0.14	1.64	9.08	5.44	-2.59	14.02	11.41	0.93	21.45	17.57	-3.93
2	3.54	1.09	2.04	10.35	6.45	-2.71	14.41	12.49	0.63	22.23	18.45	-3.92
3	4.51	1.55	2.45	11.55	7.43	-2.95	15.21	13.47	0.46	22.58	19.32	-3.97
4	5.40	2.36	2.85	12.58	8.35	-3.26	16.01	14.36	0.39	23.35	20.17	-4.07
5	---	3.11	3.22	6.23	9.22	-3.59	13.44	15.16	0.42	16.42	21.00	-4.18
6	0.13	3.45	3.53	7.05	10.05	-3.92	14.17	15.53	0.52	17.26	21.42	-4.29
7	0.50	4.16	3.78	7.43	10.47	-4.21	14.47	16.29	0.68	18.14	22.25	-4.37
8	1.29	4.48	3.94	8.19	11.28	-4.46	15.19	17.04	0.90	19.01	23.08	-4.39
9	2.09	5.23	4.00	8.55	12.08	-4.64	15.52	17.45	1.13	19.51	23.52	-4.33
10	2.52	5.59	3.93	9.30	12.50	-4.75	16.27	18.26	1.35	20.45	---	---
11	3.38	0.40	-4.18	10.07	6.38	3.73	17.07	13.33	-4.80	21.42	19.13	1.55
12	4.26	1.29	-3.95	10.44	7.19	3.39	17.50	14.17	-4.78	22.47	20.04	1.72
13	5.20	2.25	-3.68	11.22	8.05	2.93	18.36	15.05	-4.71	23.57	21.01	1.88
14	---	3.24	-3.41	6.20	8.57	2.38	12.03	15.57	-4.62	19.27	22.05	2.07
15	1.13	4.27	-3.23	7.30	9.57	1.83	12.50	16.51	-4.55	20.20	23.19	2.36

16	2.31	5.36	-3.22	8.49	11.07	1.36	13.42	17.48	-4.54	21.14	---	---
17	3.43	0.31	2.79	10.13	6.43	-3.42	14.42	12.27	1.09	22.08	18.45	-4.60
18	4.48	1.36	3.30	11.33	7.45	-3.79	15.46	13.44	1.05	23.01	19.41	-4.72
19	5.44	2.31	3.81	12.38	8.44	-4.23	16.48	14.50	1.18	23.50	20.33	-4.87
20	---	3.22	4.24	6.34	9.36	-4.67	13.33	15.46	1.38	17.45	21.25	-4.99
21	0.37	4.08	4.52	7.22	10.25	-5.03	14.19	16.35	1.56	18.39	22.14	-5.05
22	1.22	4.51	4.63	8.05	11.11	-5.25	15.02	17.20	1.71	19.29	23.01	-4.99
23	2.06	5.30	4.53	8.46	11.55	-5.33	15.41	18.01	1.78	20.17	23.47	-4.81
24	2.50	6.08	4.23	9.25	12.36	-5.23	16.20	18.42	1.79	21.04	---	---
25	3.34	0.32	-4.50	10.02	6.45	3.77	17.00	13.19	-5.05	21.52	19.23	1.74
26	4.19	1.19	-4.08	10.36	7.20	3.17	17.39	14.00	-4.73	22.44	20.05	1.64
27	5.08	2.08	-3.59	11.08	7.55	2.48	18.22	14.42	-4.36	23.41	20.51	1.54
28	---	3.00	-3.08	6.01	8.33	1.75	11.36	15.27	-3.98	19.05	21.45	1.46
29	0.47	3.59	-2.64	7.05	9.13	1.04	12.00	16.17	-3.64	19.54	22.55	1.47
30	2.02	5.02	-2.36	8.33	10.05	0.41	12.11	17.08	-3.41	20.45	---	---
31	---	0.17	1.67	3.16	6.12	-2.33	---	11.30	-0.05	21.36	18.04	-3.32

6.2. Storie temporali delle velocità della corrente.

Dai dati indicati è possibile ricostruire l'andamento temporale delle velocità nell'intero anno in esame. Si riporta di seguito la sequenza temporale di stanche (ore di velocità nulla) e picchi di velocità, previsti nella località di riferimento Punta Pezzo.

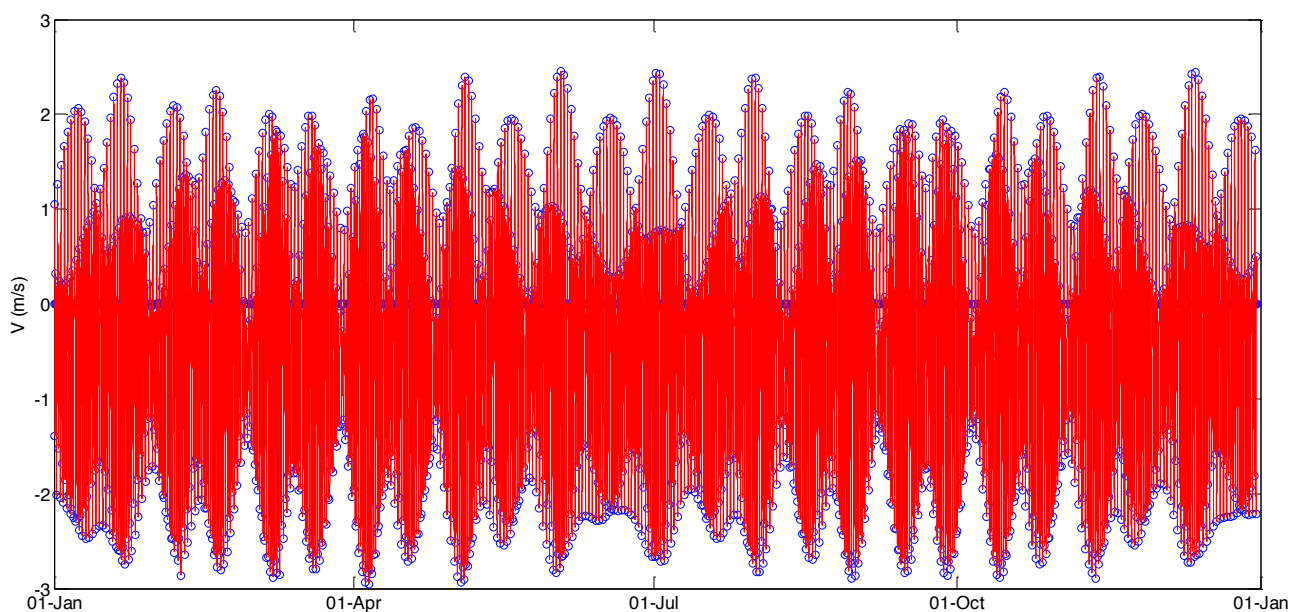


Figura 12. Storia temporale delle calme e dei picchi di velocità nella località Punta Pezzo (anno 2004). Corrente entrante (+), corrente uscente (-).

Per una previsione di maggiore dettaglio della storia temporale delle velocità della corrente, e di conseguenza della potenza erogata dai sistemi di conversione energetica esaminati, si rende necessaria una operazione di interpolazione dei dati relativi ai picchi e alle calme. A tale scopo si è adottata una interpolazione cubica hermitiana per preservare la forma della storia dei picchi. Si riporta di seguito un dettaglio della storia temporale delle velocità relativo ad un intervallo temporale limitato ad alcuni giorni.

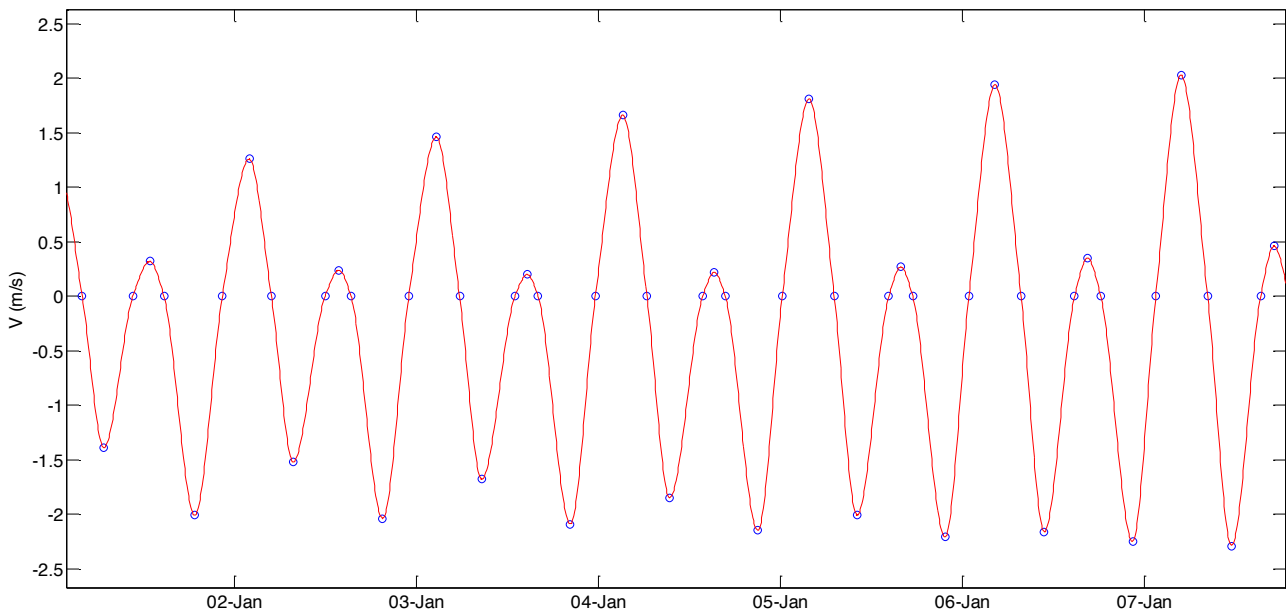


Figura 13. Dettaglio della storia temporale delle velocità nel sito di riferimento di Punta Pezzo. (interpolazione cubica)

Si nota un tipico andamento costituito dalla successione di cicli semi-diurni con cicli approssimativamente mensili di variazione dei picchi massimi locali. Si nota in particolare il raggiungimento di circa quattro condizioni di picco al giorno con due inversioni di direzione delle velocità. I picchi di velocità variano nel corso dell'anno secondo uno schema tipico delle maree lunisolari. Si nota inoltre che nel sito di riferimento sono raggiunte velocità leggermente maggiori nella direzione discendente (Tirreno - Ionio).

6.3. Correzione della velocità in siti diversi dello stretto.

Le tavole di marea presentano un metodo per la stima delle velocità della corrente in diversi punti di interesse dello stretto. Assunta la località Punta Pezzo come riferimento, è possibile determinare i valori degli istanti di occorrenza di un dato evento (stanca o picco) e dei picchi di velocità in alcune località secondarie di interesse. Il metodo adottato per la stima delle velocità nei siti secondari si basa sugli studi del prof. F. Vercelli [15]. In base alla vasta mole di osservazioni delle correnti nello stretto ricavate in una serie di crociere condotte, è stato possibile determinare delle correlazioni tra le velocità di picco delle correnti di marea e i relativi istanti di occorrenza in diversi punti di interesse. In particolare è possibile assumere una relazione lineare di correlazione tra le velocità.

$$V' = R \cdot V_c + V_0'$$

dove V' è la velocità nella località secondaria da calcolare, V_c è la velocità nel sito di riferimento, R è un opportuno fattore di scala dipendente dal sito (rapporto tra la velocità della corrente nella località secondaria e in quella di riferimento), V_0' è la differenza tra la velocità della corrente permanente nella località secondaria e quella nella località di riferimento (Punta Pezzo).

Preso come riferimento il sito di Punta Pezzo, si riportano di seguito le località secondarie di cui è possibile determinare le velocità della corrente con il metodo esposto ed i relativi coefficienti di correzione.

Tabella 13. Calcolo delle velocità in località secondarie in base alle predizioni nella località di riferimento Punta Pezzo. Coefficienti di correzione.

				Differenza di ora	Rapporto Velocità	V0'
	Località secondarie	Lat.	Lon.	h		m/s
1	Zona centrale tra Scilla e C. Peloro	38°15'48"	15°41'00"	0.50	0.15	-0.154
2	Zona centrale tra T. Cavallo e C. Peloro	38°15'24"	15°40'00"	0.25	0.30	-0.303
3	Centro della Trasversale Ganzirri – P. Pezzo	38°14'30"	15°37'24"	0.00	0.90	0.324
4	Adiacenze di S. Agata	38°14'54"	15°36'24	-0.25	0.65	0.236
5	Adiacenze di Pace	38°14'09"	15°35'12"	-1.50	0.50	0.386
6	Adiacenze SW di T. Cavallo	38°14'42"	15°40'40"	0.25	0.30	-0.303
7	Adiacenze NW di T. Cavallo	38°15'00"	15°40'40"	0.25	0.50	-0.129
8	Bacino a NW di Scilla	38°15'21"	15°42'39"	0.75	0.15	0.051
9	Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro	38°15'24"	15°37'54"	0.17	0.70	0.457
10	Dintorni NE di C. Peloro	38°16'21"	15°39'33"	0.50	0.50	-0.334

In base alle velocità corrette è possibile ottenere le stime di produzione di potenza per i diversi sistemi di conversione considerati.

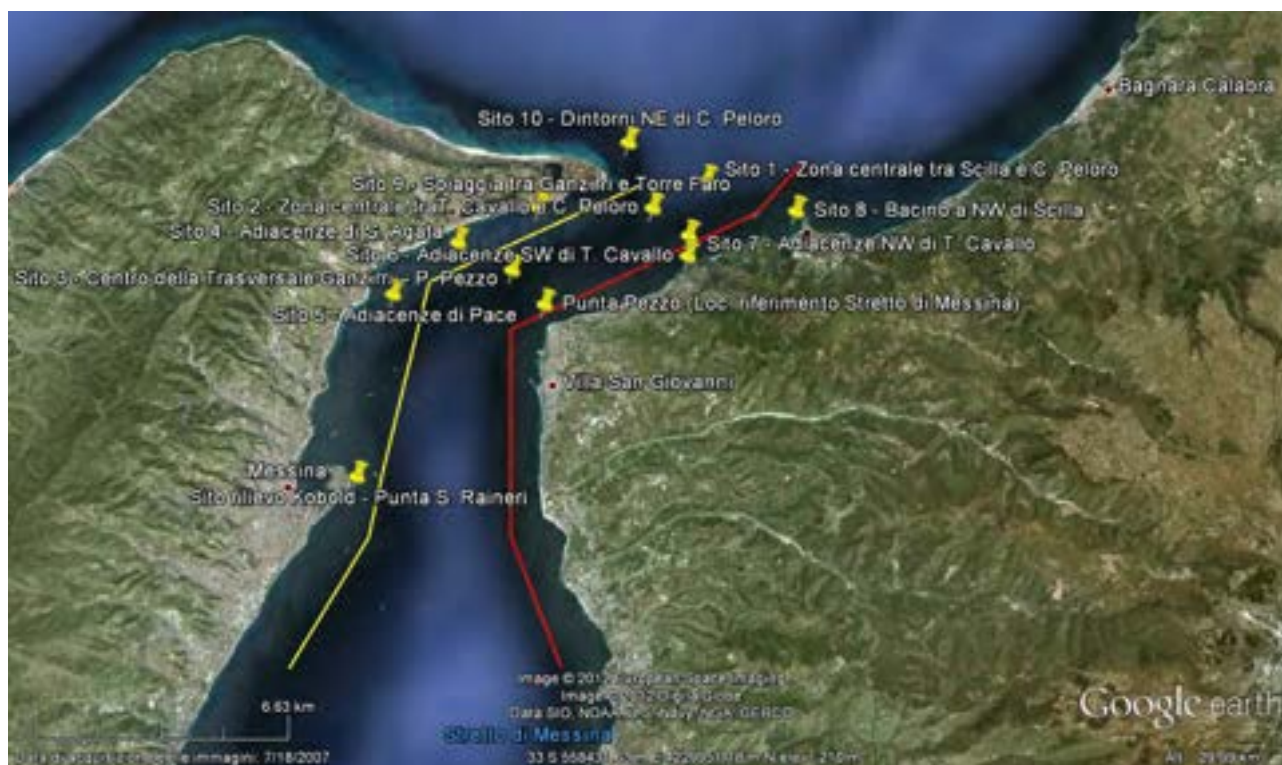


Figura 14. Posizione dei siti di rilievo secondari nello stretto di Messina.

6.4. Dati sperimentali di velocità della corrente: Rilievo di dettaglio delle velocità in un singolo punto di misura (Punta S. Raineri)

Sono disponibili rilievi di velocità e direzione della corrente in un particolare sito di osservazione



Figura 15. Sito di installazione del sistema di misura della corrente (ADCP), relativamente prossimo alla costa.

In effetti, i dati ricavati dalle tavole di Marea sono di fondamentale importanza per comprendere gli andamenti tipici dei profili temporali di velocità nel corso di un anno, e nel presente lavoro rappresentano la fonte principale su cui si basano le stime di produzione energetica. Ma per il modo in cui sono riportati (indicazione dei soli punti di picco e stanca), tali dati non danno una descrizione dettagliata delle variazioni di velocità della corrente ed in particolare non contengono informazioni di dettaglio sul profilo diurno di velocità. Tali dati, inoltre, si basano su una previsione essenzialmente basata sulla valutazione delle maree astronomiche con alcune eventuali correzioni.

Allo scopo di ottenere una più precisa stima della variazione di velocità nel corso delle 4 inversioni di direzione tipiche giornaliere, sarebbe necessaria una rilevazione effettuata in un sito specifico del profilo di velocità.

Il sito preso in esame, in effetti, presenta una caratteristica peculiare, non rappresentativa del comportamento generale delle correnti dello stretto (anche se riscontrabile in altri siti): esso, infatti, risulta caratterizzato da una direzione preferenziale di flusso, che presenta picchi di velocità significativamente superiori alle velocità massime riscontrabili nell'altra direzione di flusso.

Come riferimento si prende in esame un primo punto di rilievo nello Stretto di Messina in prossimità di Punta S. Raineri sul versante di Messina, alle coordinate geografiche

lat.: 38°11'30.2" N,
long.: 15°34'31.8" E.

ovvero in coordinate UTM:

Y=4227243.8 m N
X= 550395.7 m E



Figura 16. Sito di installazione, area interessata



Figura 17. Sito di installazione, dettaglio

La sessione di misura si è estesa nel periodo dal 17 Marzo al 20 Aprile 2010. I dati sono stati rilevati mediante un sistema di acquisizione comprendente un ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Un

Argonaut XR ADCP Sontek è stato installato ad una profondità di circa 20m, come indagine preliminare per la ricerca di eventuali siti di installazione d impianti marini. Il dispositivo, in accordo con la profondità del sito, era in grado di misurare le velocità delle correnti fino ad una profondità di 18 metri, a partire da una distanza di franco di 2 metri dalla testa del sensore.

Il sensore registra dati con una frequenza di circa 1500 s (25 min), con un intervallo di media pari a 150 s. I dati registrati sono di seguito indicati:

- V_x , V_y , V_z : componenti della velocità in un sistema di riferimento cartesiano con assi Nord, Est, verticale
- modulo della velocità nel piano orizzontale
- direzione della velocità rispetto al riferimento angolare (nord magnetico)

Le rilevazioni sono effettuate in dieci celle di ampiezza pari a 1.8 m fino ad una profondità di 18 m.

Tabella 14. Caratterizzazione del sito di misura in base alle velocità misurate a diverse profondità.

Profondità (m)	Valore max (m/s)	Valore medio (m/s)
1.8	2.37	0.69
3.6	2.42	0.69
5.4	2.41	0.70
7.2	2.40	0.70
9	2.45	0.69
10.8	2.47	0.69
12.6	2.44	0.68
14.4	2.41	0.67
16.2	2.31	0.65
18	2.18	0.60

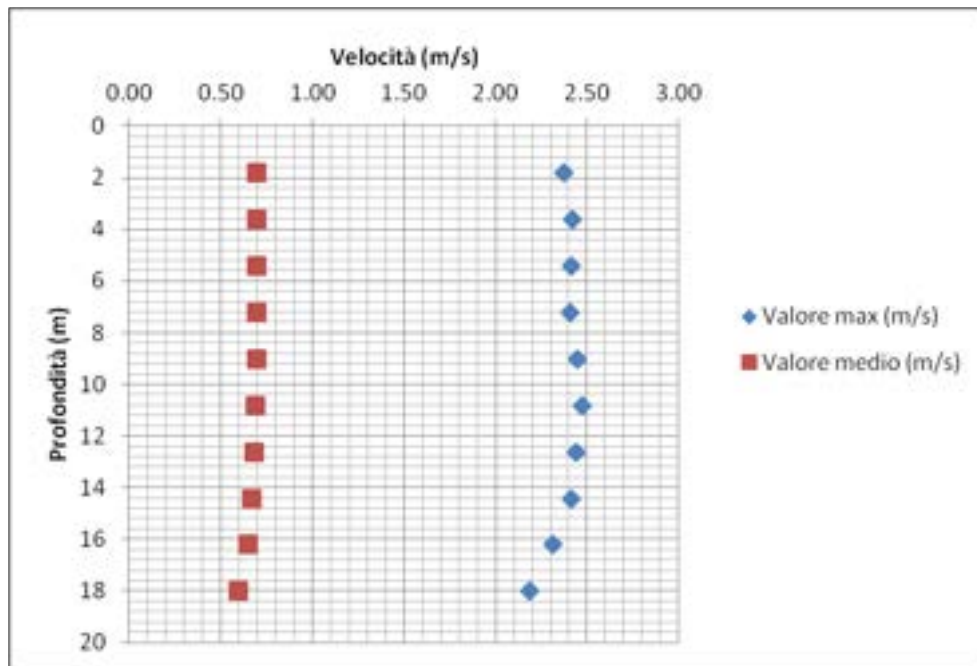


Figura 18. Profili di velocità media e massima con la profondità.

Si nota una velocità di picco massima pari a

$$V_{\max}=2.47 \text{ m/s}$$

alla profondità di 10.8 m. Le velocità massime, come quelle medie, sono piuttosto costanti con la profondità, nel campo di osservazione assunto, tranne che nelle zone prossime al fondo. La velocità media a ciascuna profondità assume un valore massimo pari a

$$V_{\text{avg}}=0.70 \text{ m/s}$$

approssimativamente costante fino ad una profondità di circa 10 m.

Si nota che i profili di velocità indicati non sembrano aderire bene al modello di riduzione della velocità della corrente con la profondità definito dalla legge della potenza con esponente 1/7, noto in letteratura e spesso suggerito dalle normative in ambito marino.

La storia temporale delle velocità e delle direzioni della corrente nel periodo di osservazione è riportata nella figura seguente, in corrispondenza di una profondità pari a 5 m.

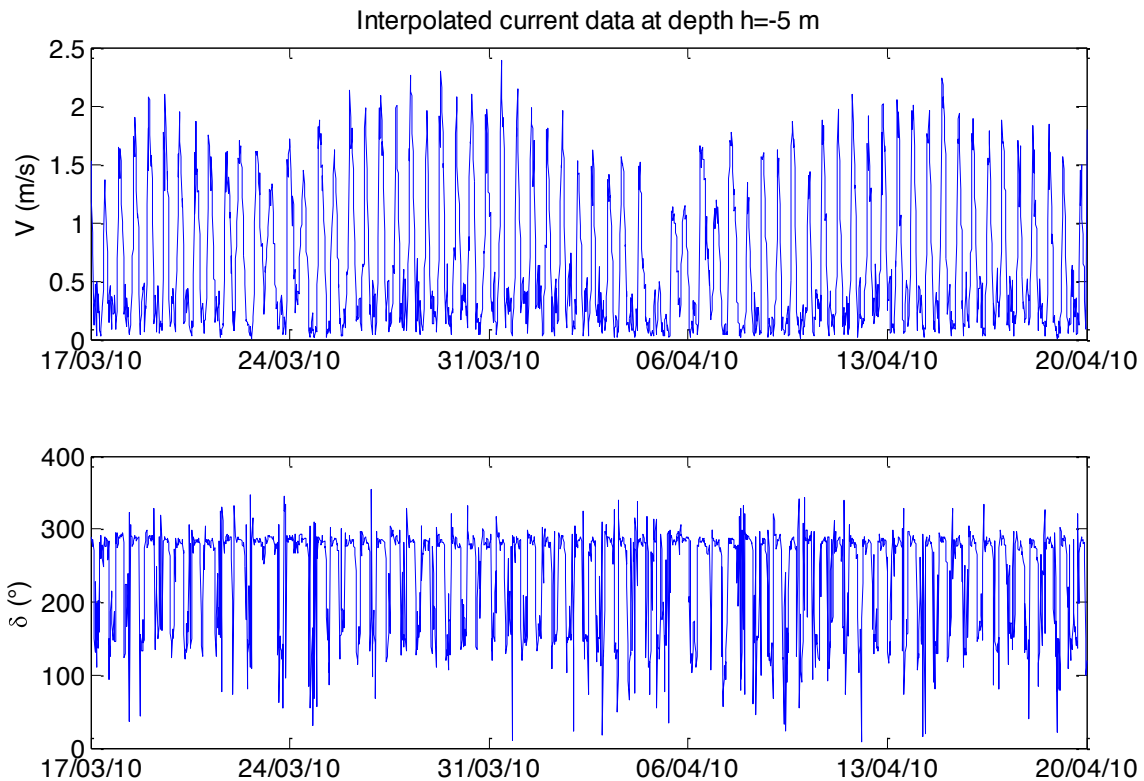


Figura 19. Storia temporale della velocità e della direzione della corrente nel periodo di osservazione. I valori riportati si riferiscono ai dati interpolati ad una profondità di 5 m.

A partire dalle storie temporali complessive è possibile individuare un andamento giornaliero della velocità e della direzione.

Dall'osservazione della storia delle direzioni della corrente, si nota la presenza di quattro rotazioni giornaliere di direzione della corrente. Nel sito in esame sembra non aversi una perfetta inversione della corrente (rotazione di 180° della corrente). Si nota altresì che, nel punto in esame, una delle due direzioni di flusso risulta privilegiata, presentando picchi più elevati: in particolare si osserva un valore massimo di circa 2.4 m/s nella direzione 280° e di circa 0.5 m/s nella direzione 150° .

Inoltre, si osserva che le due direzioni di flusso non presentano una netta inversione di direzione (rotazione di 180°), ma le due direzioni di flusso sembrano formare un angolo minore di 180° . In alcuni casi non è riscontrabile una effettiva inversione di flusso.

Sembrano riscontrarsi, comunque, due picchi giornalieri principali.

Una valutazione più precisa delle caratteristiche di produzione richiederebbe una caratterizzazione dettagliate dei profili temporali di velocità di ciascun sito in esame.

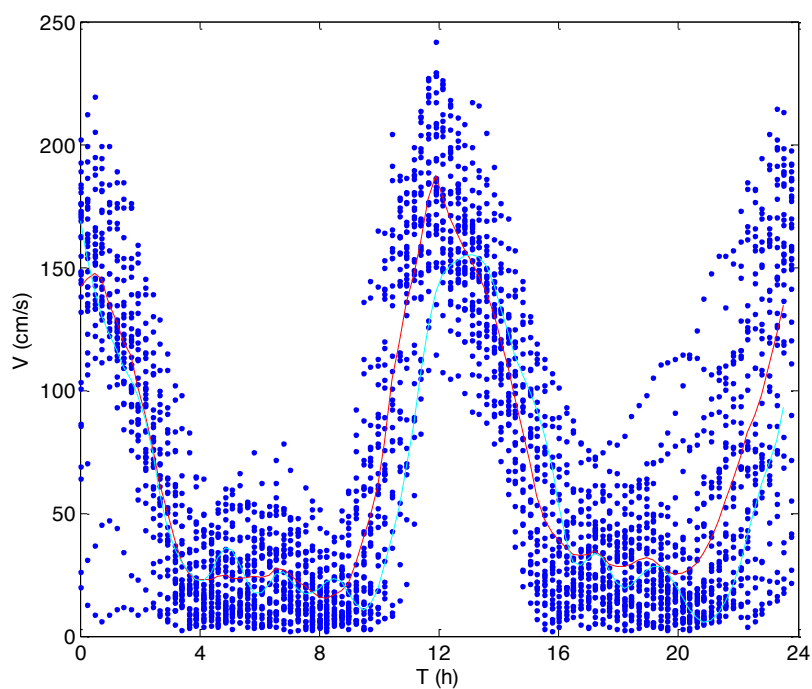


Figura 20. Velocità della corrente, andamento medio in un giorno. Dati interpolati alla profondità di 5m.

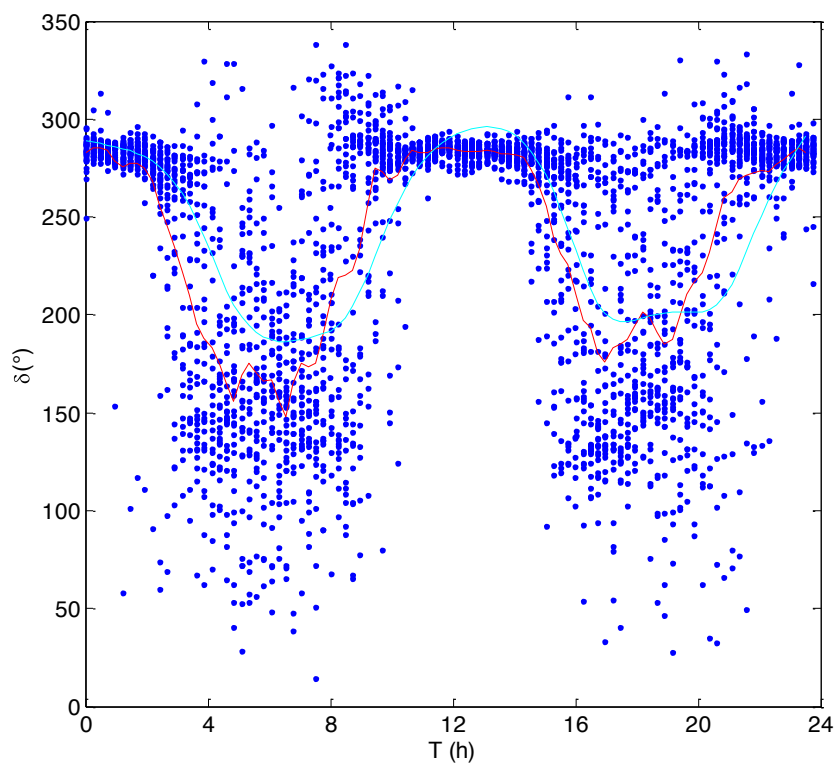


Figura 21. Direzione della corrente, andamento medio in un giorno. Dati interpolati alla profondità di 5m.

7. Vincoli di installazione

7.1. Limitazioni legate alla navigabilità

La zona dello stretto di Messina, pur presentando caratteristiche estremamente favorevoli per lo sviluppo di impianti di conversione energetica basate sulle correnti marine, prima tra tutte l'elevata velocità di picco della corrente, presenta alcuni problemi legati alla navigabilità della zona eventualmente interessata all'installazione di impianti.

La zona dello stretto è infatti attraversata da numerose rotte commerciali ed è caratterizzata da un elevato traffico navale, opportunamente regolamentato. La regolamentazione delle attività marine si esplica tra l'altro attraverso una serie di restrizioni imposte alla gestione del traffico e alla occupazione delle aree interessate ad operazioni navali. In particolare, è definito un corridoio destinato alla navigazione, corredato da opportune arre di manovra e di protezione di zone sensibili, come gli accessi ai porti. In tali aree non è possibile ottenere concessioni per l'installazione di impianti. I limiti di tali aree vanno quindi considerati come interdizioni all'installazione di impianti.

Si riporta di seguito una riproduzione schematica delle aree destinate alle operazioni navali nella zona dello stretto.



Figura 22. Aree destinate alla navigazione e di precauzione. Limiti pratici alla installazione di impianti.

Si nota la presenza di una zona interna allo stretto, divisa in due corsie di percorrenza dello stretto da un'area centrale interdetta, tale zona è riservata alla navigazione di grandi navi. Si nota, inoltre, la presenza ulteriore di zone di manovra e zone di precauzione nelle vicinanze dei porti di Messina e Villa S. Giovanni.

I limiti individuati, vanno quindi considerati come limiti pratici alla possibile installazione di impianti per lo sfruttamento di correnti marine, in relazione, almeno nell'attuale quadro normativo, con le limitazioni imposte al rilascio di concessioni di utilizzo di aree marine per lo sfruttamento energetico delle correnti.

7.2. Limitazioni paesaggistiche e ambientali

Nel corso del presente studio si escluderanno zone di interesse turistico. In particolare, nell'ambito della regione dello stretto presa in esame, presenta tale carattere la zona in prossimità di Scilla. Non verranno presi in considerazione possibili installazioni in prossimità di tale località.

8. Produzione teorica nella sezione di riferimento (metodo del flusso di energia)

8.1. Stime teoriche preliminari

Si riporta una stima della energia teorica posseduta dalla corrente nella sezione dello stretto di Messina alla latitudine del sito di riferimento Punta Pezzo. In particolare, la sezione considerata, a latitudine costante, è approssimativamente posta in corrispondenza della coordinata nord del sito di riferimento:

$$N = 4231890 \text{ m}$$

La stima della velocità nella sezione dello stretto è condotta considerando le stime di velocità in due località poste approssimativamente alle due estremità della sezione sulla costa calabra e su quella siciliana.

Le velocità nella sezione sono estrapolate a partire dai dati relativi a due punti di rilievo posti in corrispondenza delle località Punta Pezzo (sul lato calabro dello stretto) e Pace (sul lato siciliano). L'estrapolazione viene condotta nella direzione est-ovest e nel senso della profondità. In particolare, si assume una variazione lineare della velocità lungo la congiungente i due punti di rilievo, mentre tra i punti di rilievo e la costa si assume che la velocità decresca linearmente fino a zero. Nella direzione della profondità, invece, si assume che la variazione di velocità possa essere espressa in funzione della distanza dal fondo secondo una legge potenza con esponente $1/7$:

$$V_z = V_s \frac{z}{h}^{\frac{1}{7}}$$

dove z è la distanza dal fondo, h la profondità e V_s la velocità in superficie. Tale legge, pur costituendo solo un'approssimazione della reale distribuzione di velocità nello strato limite valida per profondità non eccessive, viene assunta in questo caso come indicativa della probabile distribuzione di velocità [16]. Si nota che questo profilo di velocità, oltre ad essere affetto da limiti di applicabilità in relazioni alle profondità considerate, non tiene conto della eventuale presenza di correnti profonde; tale metodo è, infatti, correlato alle sole correnti superficiali nei punti di rilievo considerati. In ogni caso il valore fornito è da considerare come solo indicativo di un valore potenziale della energia del flusso complessivo ed è riportato solo come valore di riferimento di massima.

Si osserva, inoltre, che non sono considerate le direzioni effettive della corrente nella stima del flusso di massa e di energia cinetica. Ciò risulta particolarmente significativo tenendo conto del fatto che in prossimità della località di riferimento Punta Pezzo la geografia dello stretto di Messina subisce una rapida deviazione verso nord-est, cui è possibile associare una significativa deviazione della corrente. Ciò contribuisce ad incrementare l'incertezza della stima riportata, che, si ribadisce, ha solo un valore indicativo.

Si riporta di seguito l'andamento nel tempo della velocità nei due siti noti assunti alla base della stima di velocità nella sezione di riferimento, ottenuta applicando al sito secondario le correzioni a partire dai valori di base, noti per il sito di riferimento.

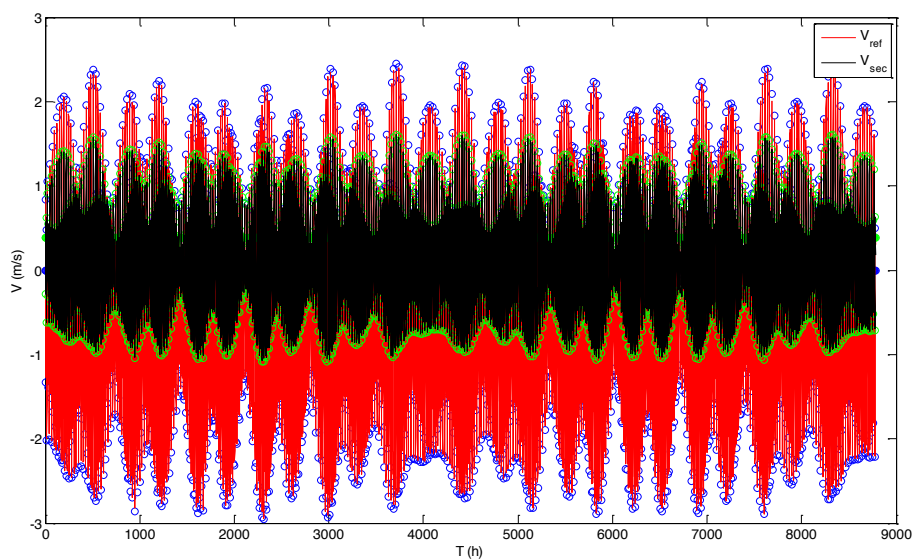


Figura 23. Velocità nei punti noti in superficie per il calcolo della velocità nella sezione (punto di riferimento Punta Pezzo, e località secondaria Pace)

Si riporta, inoltre, l'andamento teorico ipotizzato della velocità nella sezione adottato come riferimento per la stima della potenza cinetica teorica del flusso.

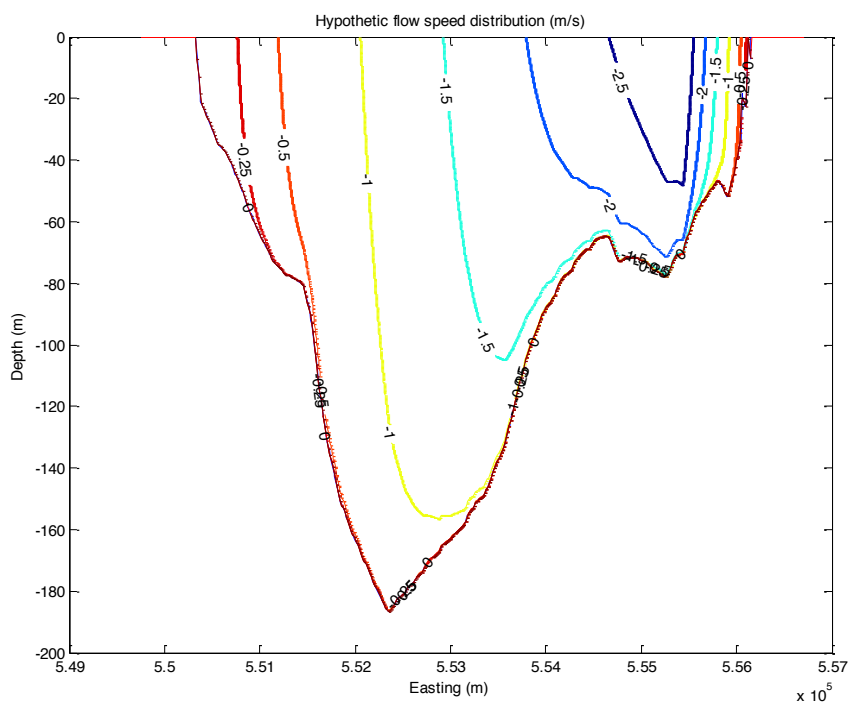


Figura 24. Distribuzione di velocità ipotizzata nella sezione dello stretto in corrispondenza della località Punta Pezzo. Le curve di livello indicano le velocità in m/s estrapolate a partire dalle stime note nelle due località di Punta Pezzo e Pace ed adottando una legge esponenziale per la variazione di velocità con la profondità. La distribuzione è relativa alla condizione di velocità massima a Punta Pezzo. (dimensioni non in scala)

La sezione della batimetria locale dello stretto all'altezza di Punta Pezzo ha un'area complessiva di circa $5.75 \times 10^5 \text{ m}^2$. Nella condizione di *massima velocità a Punta Pezzo*, con le assunzioni fatte circa la distribuzione di velocità, si registra un flusso di massa pari a

$$Q_{\text{teorico}} = 7.56 \times 10^5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

nella direzione nord-sud (corrente discendente), la corrente montante ha un flusso massimo leggermente inferiore. La velocità media nella sezione, in corrispondenza del picco di velocità nella località di riferimento Punta Pezzo, è pari

$$V_m = Q_t / A_s \cong 1.31 \text{ m/s}$$

Si osserva, inoltre, una potenza cinetica media nella sezione considerata, in corrispondenza della massima velocità a Punta Pezzo, pari a

$$P_m = \frac{1}{2} \rho V^3 S = 1.16 \text{ GW}$$

proporzionale alla media della velocità al cubo nella sezione.

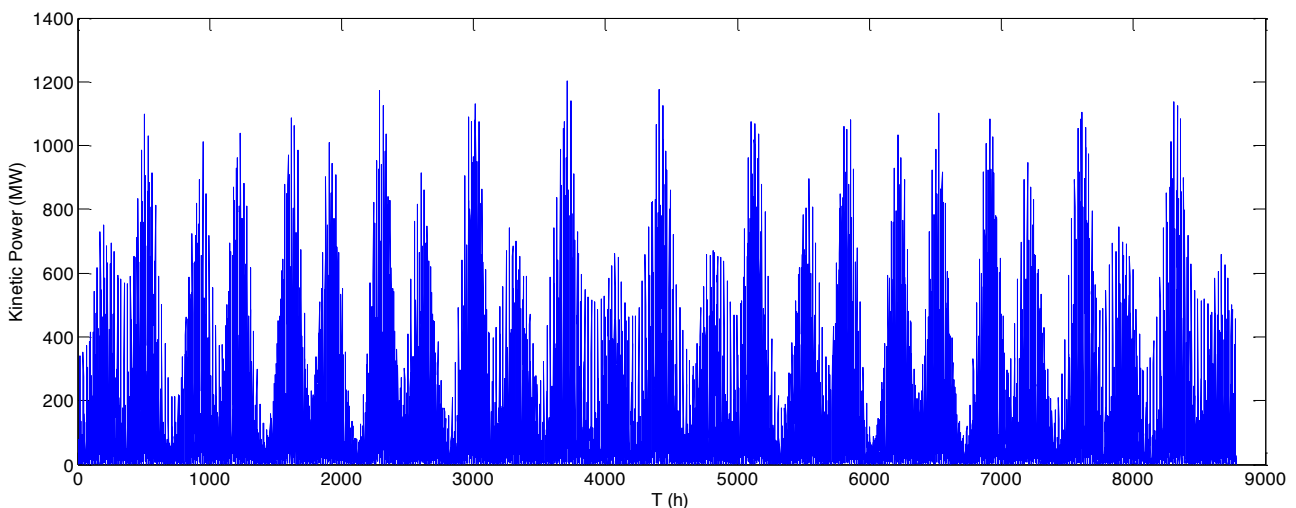


Figura 25. Potenza cinetica della corrente nella sezione dello Stretto a Punta Pezzo.

Il valore massimo della potenza cinetica media registrata è pari a $P_{\text{max cinetica}} \cong 1.2 \text{ GW}$

Il valore indicato è puramente teorico. In particolare, esso non tiene in considerazione l'effettiva direzione di flusso, assumendo che la velocità sia normale alla sezione considerata. Oltre a essere affetto dalle approssimazioni insite nella stima di velocità nella sezione, il valore calcolato rappresenta la potenza cinetica della corrente. Secondo la teoria di Betz solo una frazione di tale energia è effettivamente sfruttabile. In particolare, il limite di Betz per la teoria del disco attuatore semplice fornisce un limite superiore teorico alla potenza sfruttabile della corrente, pari al 59.3% della potenza cinetica complessiva². Considerando tale limite, la potenza teorica ricavabile da macchine ideali nel flusso complessivo ipotizzato si riduce a

$$P_{\text{max teorica}} = 0.708 \text{ GW}$$

Tale valore di potenza è relativo alla condizione di massima velocità nel sito di riferimento Punta Pezzo. considerando le variazioni annuali (riferite all'anno 2004) di velocità della corrente, nei due punti di misura, si ottiene l'energia annua teorica estraibile dalla corrente con macchine ideali

² Come già riferito, l'uso di un diffusore, applicato ad alcuni dei sistemi di conversione considerati, può condurre ad un apparente incremento dell'efficienza oltre il limite di Betz, essenzialmente per effetto dell'incremento di portata elaborata dalla turbina. (si veda ad esempio [9]).

Energia cinetica annua teorica: $E_0 \cong 1471 \text{ GWh}$

ovvero considerando il coefficiente di potenza ideale di 0.59

Produzione annua teorica con macchina ideale (teoria di Betz): $E_{\text{annua teorica}} \cong 868 \text{ GWh}$

La stima di energia prodotta in un anno è stata condotta per integrazione numerica nel tempo la potenza cinetica nella sezione, assumendo un intervallo temporale di 1 h.

Tale valore rappresenta una stima preliminare dell'energia estraibile teoricamente **in una sola sezione alla latitudine della località di riferimento** e viene riportato come valore indicativo di riferimento delle potenzialità teoriche connesse all'energia complessiva posseduta dalla corrente, affetto dalle semplificazioni ed approssimazioni riportate in precedenza.

8.2. Una valutazione di producibilità basata sul flusso di energia cinetica

Alcune fonti (ad esempio [1]) utilizzano un fattore di stima della effettiva producibilità di un sito a correzione delle stime teoriche di energia cinetica posseduta dalla corrente (metodo del flusso di energia). Tale fattore, a volte definito "Significant Impact Factor" (SIF) è di difficile valutazione, perché coinvolge diverse considerazioni connesse alla natura del sito e alla sua effettiva sfruttabilità. Il SIF è infatti definito come la frazione di energia teorica effettivamente estraibile senza significativi effetti economici ed ambientali. La fonte citata fornisce una indicazione generale per il fattore di impatto

$$\text{SIF}=20\%$$

Basandosi su tale impostazione una stima iniziale di producibilità per l'area dello stretto

$$E_{a1}=0.2 \times E_a = 294 \text{ GWh}$$

Tale valutazione è relativa alla sezione della batimetria in corrispondenza della latitudine del sito di riferimento Punta Pezzo.

Tale stima inoltre, va considerata ancora puramente teorica perché riferita alla sezione complessiva della stretto impossibile da sfruttare completamente, e perché riferita ad una macchina ideale con coefficiente di potenza pari a 0.59 (limite di betz). Per i sistemi in esame si può stimare la producibilità considerando il corrispondente valore del coefficiente di potenza.

Tale valutazione è approssimata per il fatto di trascurare la presenza della velocità di cut-in (velocità a cui la turbina comincia a produrre energia) e le differenze di funzionamento rispetto alla legge cubica, particolarmente significative oltre la velocità nominale. Nell'ipotesi di trascurare tali effetti si ha per i sistemi esaminati:

Tabella 15. Stime di producibilità in base al metodo del flusso di energia (SIF=20%).

Sistema	Coeff. di potenza	Efficienza globale ($C_p \times \text{rendimento}$)	Energia annua (GWh)
SeaGen MCT	0.45	$0.8 \times 0.45 = 0.36$	105.9
Kobold	0.3	$0.8 \times 0.3 = 0.24$	70.6
GEM	$0.75 \text{ (con diffusori)}^3$	$0.8 \times 0.75 = 0.60$	176.5
Fri-El	0.316	$0.8 \times 0.316 = 0.25$	74.4
Verdant Power	0.336	$0.8 \times 0.336 = 0.27$	79.1
Valore medio=			101.3

³ per l'apparente superamento del limite di Betz si veda la nota 2.

Il confronto tra le tipologie di sistema è effettuato in questo caso a parità di superficie complessiva investita dalla corrente. Tale condizione è in realtà di difficile realizzazione, essendo i diversi sistemi caratterizzati da diversi ingombri operativi e diverse possibili densità di installazione in un dato sito.

9. Stime di produzione in ipotetiche installazioni di fattorie marine (metodo delle fattorie)

9.1. Osservazioni ed ipotesi di calcolo delle produzioni di energia

Si procede ad una stima delle possibili produzioni di energia in alcuni siti di interesse, in cui sono disponibili informazioni sulla serie temporale delle velocità. Da un punto di vista pratico, si assume che le fattorie siano installate in zone non troppo distanti dalla costa e di dimensioni limitate, sia per non interferire con le operazioni navali, che per agevolare o rendere possibile l'installazione e la manutenzione delle unità installate.

La scelta delle dimensioni del sito è legata a considerazioni pratiche relative alla disponibilità di concessione delle aree di installazione e le dimensioni del sito sono vincolate dalla massima distanza utile dalla costa, fino ai limiti imposti per non interferire con la navigazione. Si riportano a titolo illustrativo le distanze misurate in direzione est-ovest tra la curva di livello a 20 m di profondità e le curve limite operative indicate al par. 7.

Tabella 16. Distanza tra la curva di livello a -20 m e la curva limite operativa (valutazione di massima basata sulla distanza misurata nella direzione est-ovest)

N° SITO	Località	Distanza disponibile est-ovest
Sito di riferimento (lato est)	Loc. di riferimento Punta Pezzo	915
Sito 4 (lato ovest)	Adiacenze di S. Agata	1402
Sito 5 (lato ovest)	Adiacenze di Pace	1975
Sito 7 (lato est)	Adiacenze NW di T. Cavallo	1052
Sito 8 (lato est)	Bacino a NW di Scilla	1118
Sito 9 (lato ovest)	Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro	1815
Sito 10 (lato ovest)	Dintorni NE di C. Peloro	1855

Le distanze sopra riportate sono misurate in direzione est-ovest, e possono sovrastimare le dimensioni laterali effettivamente utilizzabili per le fattorie. Si riportano di seguito stime delle distanze in direzione approssimativamente normale alla linea di costa in corrispondenza dei siti noti.

Tabella 17. Distanze utilizzabili normali alla linea di costa – (stime approssimate da Google Earth)

le distanze sono valutate in direzione approssimativamente normale alla costa e alla linea limite	
Punta pezzo:	290 m
sito 4 Adiacenze S. Agata:	970 m
sito 5 Adiacenze Pace:	1490 m
sito 7 Adiacenze NW di T. Cavallo:	400 m
Sito 8 Bacino NW di Scilla:	1200 m
Sito 9 Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro:	700 m
Sito 10 Dintorni NE di Capo Peloro:	975 m

Si nota che i siti indicati come 1, 2 e 3 non sono considerati perché posti nella zona di transito del traffico marittimi dello stretto.

Si nota che come riferimento per le distanze è stata presa la curva di livello batimetrico a 20 m, avendo assunto tale profondità come minima profondità utile per la installazione dei sistemi immersi presi in considerazione. Tale profondità, in realtà, è caratteristica di ciascuno specifico sistema.

Inoltre, si osserva che limitazioni legate alla complessità d installazione e funzionamento sono imposte anche dalla massima profondità del fondale nel sito di installazione. L'incremento della profondità del sito è connesso direttamente ad un incremento di costi di installazione e, anche in fase operativa, può comportare una maggiore complessità degli interventi eventualmente necessari all'impianto. Nel presente studio **si assume un limite indicativo di 150 m di profondità massima del fondale utilizzabile.**

Si assumono, inoltre, le dimensioni di ingombro operativo longitudinale ΔL e laterale, ΔW , caratteristiche delle unità di produzione di ciascun sistema definite al par. 1. In base alle dimensioni caratteristiche dell'area di installazione e alle dimensioni di ingombro operativo del sistema è stato determinato il numero di unità installabili

$$N_{\text{unit}} = \rho_{\text{inst}} A_{\text{sito}}$$

(dove ρ_{inst} è la densità di installazione, numero di unità installabili per unità di area, e A_{sito} è l'area in pianta occupata dalla ipotetica installazione) e quindi la potenza complessiva installata. La densità di installazione è valutabile in base agli ingombri delle singole macchine considerate. L'ingombro operativo della singola unità è stato valutato sommando alle dimensioni geometriche longitudinali, ΔL_g , e laterali, ΔW_g , effettive dei sistemi considerati una opportuna distanza di sicurezza sia in direzione longitudinale, ΔL_c , che laterale, ΔW_c .

Tali distanze di sicurezza sono necessarie a garantire:

- la funzionalità dei sistemi (distanze minime di riduzione della interferenza di scia)
- le operazioni eventualmente necessarie al funzionamento (ad esempio, la rotazione e l'allineamento al flusso di strutture galleggianti)
- le necessità operative (accessibilità, interventi manutentivi)

$$\begin{aligned}\Delta L &= \Delta L_g + \Delta L_c \\ \Delta W &= \Delta W_g + \Delta W_c\end{aligned}$$

Per definire il numero di unità installate, si assume, inoltre, che ciascuna unità occupi sia in senso longitudinale che trasversale uno spazio pari alle sue dimensioni geometriche incrementato della distanza di sicurezza. In tal modo è stato possibile stimare le densità di installazione per ciascun sistema, che sono riportate di seguito

$$\rho_{\text{inst}} = 1/(\Delta W + \Delta L)$$

Tabella 18. Densità di installazione dei sistemi considerati.

Sistema	Densità installazione
SeaGen	40 unità/km ²
Kobold	23 unità/km ²
GEM	36 unità/km ²
Fri-el	2.5 unità/km ²
Verdant Power	16 unità/km ²

9.2. Valutazione preliminare dei siti in base alle velocità massime

In base alle stime di velocità derivate dalle tavole di marea è possibile operare una prima discriminazione dei siti di interesse in base alle relative velocità caratteristiche. prendendo come riferimento la velocità di picco. si osserva che alcuni dei siti presentano velocità massime inferiori a 1 m/s. Tlai sisti presentano scarso interesse ai fini di potenziali installazioni. Si riporta di seguito l'elenco dei siti noti con l'indicazione delle velocità massime attese.

Tabella 19. Velocità massime nei siti di interesse.

Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)
Punta Pezzo	38°14'00"N	15°38'00"E	2.949
Località secondarie	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)
Zona centrale tra Scilla e C. Peloro	38°15'48"N	15°41'00"E	0.597
Zona centrale tra T. Cavallo e C. Peloro	38°15'24"N	15°40'00"E	1.188
Centro della Trasversale Ganzirri - P. Pezzo	38°14'30"N	15°37'24"E	2.529
Adiacenze di S. Agata	38°14'54"N	15°36'24"E	1.829
Adiacenze di Pace	38°14'09"N	15°35'12"E	1.611
Adiacenze SW di T. Cavallo	38°14'42"N	15°40'39"E	1.188
Adiacenze NW di T. Cavallo	38°15'00"N	15°40'40"E	1.604
Bacino a NW di Scilla	38°15'21"N	15°42'39"E	0.419
Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro	38°15'24"N	15°37'54"E	2.172
Dintorni NE di C. Peloro	38°16'21"N	15°39'33"E	1.809

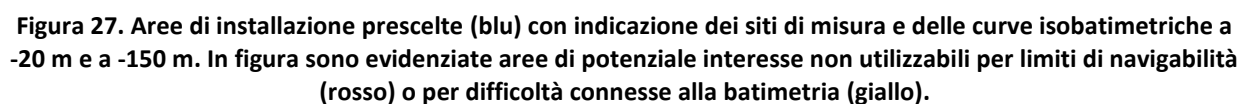
Le velocità riportate sono stimate in superficie.

Nel sito dove sono disponibili rilievi sperimentali di velocità della corrente, presso Punta S. Raineri, la velocità massima attesa ad una profondità di circa 5 m è stima pari a circa 2.39 m/s (valore stimato per interpolazione dei dati misurati).

9.3. Aree di installazione prescelte

In base ai criteri di selezione indicati sono state scelte un certo numero di aree di possibile installazione di fattorie marine. A ciascuna area è associato un punto di misura ricavato dalle tavole di marea, sulla cui storia temporale di velocità della corrente saranno basate le stime di produzione. Si riportano di seguito, in Figura 27, le aree prescelte con l'indicazione del sito di misura. Sono, inoltre, riportate le linee limite entro cui si ritengono sviluppabili le eventuali installazioni:

- linee isobatimetriche a -20 m e a -150m
- curve limite delle zone riservate alla navigazione



In rosso sono indicate le aree che non si prendono in esame per limiti operativi imposti o dalle limitazioni di navigabilità o dalla profondità eccessiva. Inoltre, come indicato in precedenza, non sono state prese in esame zone di potenziale interesse turistico (presso la località Scilla).

Le aree considerate sono rappresentate da poligoni, identificati dai loro vertici in coordinate UTM. Si riportano di seguito le definizioni delle aree poligonali considerate e i relativi siti di stima della velocità.

Area 1: Punta Pezzo

Vertici

555543.00 m E 4231751.00 m N
555412.00 m E 4231954.00 m N
557759.00 m E 4232751.00 m N
557875.00 m E 4232566.00 m N

Area 2: Sito 7 – Adiacenze T. Cavallo

Vertici

557950.00 m E 4232595.00 m N
557788.00 m E 4232881.00 m N
559285.00 m E 4233821.00 m N
560722.00 m E 4234496.00 m N
560897.00 m E 4234184.00 m N
559488.00 m E 4233569.00 m N

Area 3: villa S. Giovanni sud -opposto S. Raineri (lato calabro) prima parte

Vertici

554643.00 m E 4229067.00 m N
555222.00 m E 4229069.00 m N
555233.00 m E 4227578.00 m N
555454.00 m E 4226428.00 m N
555128.00 m E 4226423.00 m N
554928.00 m E 4227558.00 m N

Area 4: Sito 9 - Ganzirri

Vertici

554209.00 m E 4234405.00 m N
554523.00 m E 4233958.00 m N
556095.00 m E 4234608.00 m N
555915.00 m E 4234956.00 m N

Area 5: Sito 4 - Adiacenze di S. Agata

Vertici

554042.00 m E 4234370.00 m N
554333.00 m E 4233992.00 m N
552373.00 m E 4232869.00 m N
552111.00 m E 4233409.00 m N

Area 6: Sito 5 - Adiacenze di Pace

Vertici

551660.00 m E 4233295.00 m N
552191.00 m E 4232866.00 m N
550692.00 m E 4230438.00 m N
550038.00 m E 4230760.00 m N

Area 7: S. Raineri - limite sud

Vertici

550519.00 m E 4227239.00 m N

551022.00 m E 4227105.00 m N

548541.00 m E 4222579.00 m N

547922.00 m E 4222701.00 m N

Area 7 bis: sotto S. Raineri (non utilizzata per limiti di profondità)

548541.00 m E 4222579.00 m N

547922.00 m E 4222701.00 m N

550763.00 m E 4226550.00 m N

550220.00 m E 4226742.00 m N

Area 8: Sotto S. Raineri (lato calabro, Casalotto) – (non utilizzata per limiti di profondità)

Vertici

554771.00 m E 4225762.00 m N

555519.00 m E 4225797.00 m N

556754.00 m E 4222762.00 m N

555963.00 m E 4222755.00 m N

Si riportano le aree delle superfici occupate da ciascun impianto considerato.

Area	Sito di rilievo della velocità	Area della superficie occupata (km ²)	
Area 1	Sito di rif. Punta Pezzo	0.5538	
Area 2	Sito 7 – Adiacenze NW di T. Cavallo	1.1068	
Area 3	San Raineri	1.0285	
Area 4	sito 9 – Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro	0.8004	
Area 5	Sito 4 – Adiacenze di S. Agata	1.1819	
Area 6	Sito 5 – Adiacenze di Pace	2.0578	
Area 7	San Raineri	0.3208	Non utilizzato
Area 8	San Raineri	2.3519	Non utilizzato
	Superficie totale utilizzata	6.7 km²	

9.4. Stime basate sulle velocità ricavate dalle tavole di marea

Si riportano le stime di produzione relative ad alcuni dei siti rappresentativi dello stretto riportati in precedenza. In particolare, si escludono i siti posti nella zona centrale dello stretto e riservati alle operazioni navali e quindi non sfruttabili per eventuali installazioni di impianti di conversione. D'altro canto, la parte centrale dello stretto presenta profondità significative; nella sezione alla latitudine di Punta Pezzo, ad esempio, si ha una profondità massima di circa 185 m. Elevate profondità possono costituire una limitazione all'installabilità per alcune tipologie di sistema.

Per ciascuna tipologia di sistema si riportano le produzioni di energia in ciascuna località secondaria, assumendo le dimensioni delle fattorie.

Tabella 20. Produzioni fattorie – sistema MCT SeaGen

SeaGen										
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Punta Pezzo	38°14'00"N	15°38'00"E	2.95	0.5538	40	22	1000.9	22019.4	53528.5	2431.0
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Adiacenze NW di T. Cavallo	38°15'00"N	15°40'40"E	1.60	1.107	40	44	1000.9	44038.7	20257.1	460.0
Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro	38°15'24"N	15°37'54"E	2.17	0.800	40	32	1000.9	32028.2	29872.4	932.7
Adiacenze di S. Agata	38°14'54"N	15°36'24"E	1.83	1.182	40	47	1000.9	47041.4	31766.9	675.3
Adiacenze di Pace	38°14'09"N	15°35'12"E	1.61	2.058	40	82	1000.9	82072.2	29269.9	356.6
								Etot=	164694.7	MWh
						eta_wake=	0.712	Etot_wake=	117262.6	MWh

Per la turbina ad asse verticale Kobold sia hanno i seguenti risultati.

Tabella 21. Produzioni fattorie – sistema Kobold

Kobold										
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Punta Pezzo	38°14'00"N	15°38'00"E	2.95	0.5538	23	12	1000.6	12007.08	29188.9	2431.0
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Adiacenze NW di T. Cavallo	38°15'00"N	15°40'40"E	1.60	1.1068	23	25	1000.6	25014.8	11506.3	460.0
Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro	38°15'24"N	15°37'54"E	2.17	0.8004	23	18	1000.6	18010.6	16798.3	932.7
Adiacenze di S. Agata	38°14'54"N	15°36'24"E	1.83	1.1819	23	27	1000.6	27015.9	18243.8	675.3
Adiacenze di Pace	38°14'09"N	15°35'12"E	1.61	2.0578	23	47	1000.6	47027.7	16771.7	356.6
								Etot=	92509.0	MWh
						eta_wake=	0.712	Etot_wake=	65866.4	MWh

Analogamente per il sistema GEM si ottengono i seguenti risultati in termini di producibilità annua.

Tabella 22. Produzioni fattorie – sistema GEM

GEM										
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Punta Pezzo	38°14'00"N	15°38'00"E	2.95	0.5538	36	19	1001.1	19021.47	46240.5	2431.0
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Adiacenze NW di T. Cavallo	38°15'00"N	15°40'40"E	1.60	1.1068	36	39	1001.1	39044.1	17959.4	460.0
Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro	38°15'24"N	15°37'54"E	2.17	0.8004	36	28	1001.1	28031.6	26144.6	932.7
Adiacenze di S. Agata	38°14'54"N	15°36'24"E	1.83	1.1819	36	42	1001.1	42047.5	28394.3	675.3
Adiacenze di Pace	38°14'09"N	15°35'12"E	1.61	2.0578	36	74	1001.1	74083.6	26420.6	356.6
								Etot=	145159.5	MWh
						eta_wake=	0.712	Etot_wake=	103353.6	MWh

Per il sistema Fri-el si hanno i seguenti risultati.

Tabella 23. Produzioni fattorie – sistema Fri-El

Fri-El										
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Punta Pezzo	38°14'00"N	15°38'00"E	2.95	0.5538	2.55	1	1001.1	1001.1	2433.6	2431.0
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Adiacenze NW di T. Cavallo	38°15'00"N	15°40'40"E	1.60	1.1068	2.55	2	1001.1	2002.2	921.0	460.0
Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro	38°15'24"N	15°37'54"E	2.17	0.8004	2.55	2	1001.1	2002.2	1867.4	932.7
Adiacenze di S. Agata	38°14'54"N	15°36'24"E	1.83	1.1819	2.55	3	1001.1	3003.3	2028.1	675.3
Adiacenze di Pace	38°14'09"N	15°35'12"E	1.61	2.0578	2.55	5	1001.1	5005.5	1785.2	356.6
								Etot=	9035.3	MWh
						eta_wake=	0.712	Etot_wake=	6433.2	MWh

Per il sistema Verdant Power si hanno i seguenti risultati.

Tabella 24. Produzioni fattorie – sistema Verdant Power

Verdant Power										
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Punta Pezzo	38°14'00"N	15°38'00"E	2.9487	0.5538	16	8	1001.4	8011.2	19475.3	2431.0
Località riferimento	Lat.	Lon.	Vmax (m/s)	Area impianto (km ²)	Densità (unità/km ²)	Numero unità	Potenza max unità (kW)	Potenza installata (kW)	Energia annua (MWh)	Ore equivalenti (h)
Adiacenze NW di T. Cavallo	38°15'00"N	15°40'40"E	1.604	1.1068	16	17	1001.4	17023.8	7830.5	460.0
Spiaggia tra Ganzirri e Torre Faro	38°15'24"N	15°37'54"E	2.172	0.8004	16	12	1001.4	12016.8	11208.0	932.7
Adiacenze di S. Agata	38°14'54"N	15°36'24"E	1.8285	1.1819	16	18	1001.4	18025.2	12172.3	675.3
Adiacenze di Pace	38°14'09"N	15°35'12"E	1.611	2.0578	16	32	1001.4	32044.8	11427.6	356.6
								Etot=	62113.7	MWh
						eta_wake=	0.712	Etot_wake=	44225.0	MWh

Si nota che nella località di riferimento Punta Pezzo si hanno circa 2430 ore di funzionamento equivalente annue. I valori di producibilità si riducono a meno di un terzo di tale valore nelle altre località secondarie.

Per il sistema MCT SeaGen si ottengono le seguenti stime di produzione

Nelle precedenti tabelle sono riportate anche le ore equivalenti per ciascun sistema e per ciascun sito, definite come il numero di ore di funzionamento alla potenza nominale del sistema necessarie a produrre la stessa energia generata nel periodo di riferimento di un anno in un determinato sito (con distribuzione nota di velocità della corrente):

$$H_e = \frac{E_a}{P_{\text{nominale}}}$$

Tale quantità fornisce un parametro per confrontare le effettive capacità di sfruttamento di un dato sito da parte di un assegnato sistema di conversione.

Si nota in particolare che il massimo numero di ore equivalenti risulta pari a

$$H_{e \text{ max}} \cong 2400 \text{ h}$$

Altri siti presentano valori molto più bassi.

Si nota che, nelle ipotesi adottate per le stime condotte, le ore equivalenti variano da sito a sito, ma, avendo assunto curve di potenza cubiche con pari potenza massima non si evidenziano differenze tra i diversi sistemi.

Si nota, inoltre, che il numero di unità installate, per ciascuna tipologia di impianto è diverso, come diversa è la potenza complessiva installata.

9.5. Stime basate sui dati rilevati in un singolo sito di misura (Punta S. Raineri)

A scopo di confronto si riportano le stime di produzione basate sulle letture dei dati rilevati nella stazione correntometrica posta in prossimità di Punta S. Raineri. Si nota, a tal proposito, che come alcuni dei siti già presi in considerazione, la velocità di picco è relativamente bassa, soprattutto in una delle due direzioni di provenienza della corrente. Va notato che questa circostanza è caratteristica di questo particolare sito e, anche se potenzialmente riscontrabile in altri punti di osservazione, non è una caratteristica generale delle correnti dello stretto.

In prima approssimazione, ed in mancanza di dati locali, si applica lo stesso profilo di velocità rilevato nel sito di Punta S. Raineri anche ad altri siti posti nella sezione meridionale dello stretto (Aree 3 e 7) sul lato calabro. Tale approssimazione riduce notevolmente l'accuratezza delle previsioni locali, ma viene ritenuta ancora accettabile nell'ambito di una stima globale di producibilità. Le aree indicate come area 7bis e 8 non sono considerate per problemi di profondità del fondale.

Tabella 25. Energia annua prodotta in base ai rilievi della stazione presso punta S. Raineri – Stime basate sulle velocità interpolate a -5 m di profondità. Area 7

Sistema	Velocità massima (m/s)	Area sito (km ²)	Numero di unità installate	Potenza installata (MW)	Energia annua prodotta (GWh)
MCT SeaGen	2.39	0.32	12	12	14.3
Kobold			7	7	8.3
GEM			11	11	130.8
Fri-el			-	-	-
Verdant Power			5	5	6

Si nota che il sito esaminato nella precedente tabella presenta dimensioni non compatibili con gli ingombri operativi del sistema Fri-El.

Tabella 26. Energia annua prodotta in base ai rilievi della stazione presso punta S. Raineri – Stime basate sulle velocità interpolate a -5 m di profondità. Area 3

Sistema	Velocità massima (m/s)	Area sito (km ²)	Numero di unità installate	Potenza installata (MW)	Energia annua prodotta (GWh)
MCT SeaGen	2.39	1.03	41	41	48.7
Kobold			23	23	27.3
GEM			37	37	44.0
Fri-El			2	2	23.8
Verdant Power			16	16	19.0

Si nota che il periodo di osservazione a disposizione per il sito attualmente in esame è limitato a 811 ore di rilevamenti. Le stime condotte sono state estrapolate ad un anno, ipotizzando una produzione media costante.

Le velocità utilizzate per la stima sono relative ad una interpolazione alla profondità di 5 m.

I valori relativi a questo sito di misura non sono stati confrontati direttamente ai precedenti perché ottenuti in modo diverso (per misura attraverso correntometro acustico) e perché relativi ad un periodo di osservazione diverso.

Osservazioni e conclusioni sulle stime di produzione

Si può osservare una notevole variabilità della produzione tra i diversi sistemi installati; ciò è in parte connesso alla differenza tra le curve di potenza di ciascun sistema, in parte al fatto che il numero di unità installabili in un determinato sito dipende, una volta assegnate le dimensioni dell'area disponibile, dalle dimensioni di ingombro laterale di ciascun sistema.

Si nota che la energia annua teoricamente posseduta dalla corrente (pur valutata con le approssimazioni indicate nel documento) è pari a circa

$$E_a \cong 1471 \text{ GWh}$$

A fronte di tale potenziale complessivo, solo una frazione relativamente limitata di questo ammontare di è effettivamente fruibile attraverso le tecnologie prese in esame, per diverse ragioni:

- disponibilità di siti di installazione effettivamente dotati di una producibilità locale sufficiente
- disponibilità di aree di potenziale concessione (interferenza con le operazioni navali)
- limiti di installazione del sistema (profondità massime, distanze di sicurezza)

Applicando un *significant impact factor* pari a 0.2, una stima preliminare di producibilità pari a

$$E_a \cong 294 \text{ GWh}$$

Si nota che tale dato è relativo alla sola sezione disponibile in corrispondenza della batimetria alla latitudine del sito di riferimento Punta Pezzo e corrisponde al funzionamento ideale con $CP=0.59$. Per i sistemi reali presi in esame si riporta la seguente tabella

Tabella 27. Stime di producibilità in base al metodo del flusso di energia (SIF=20%).

Sistema	Coeff. di potenza	Efficienza globale ($C_p \times \text{rendimento}$)	Energia annua (GWh)
SeaGen MCT	0.45	$0.8 \times 0.45 = 0.36$	105.9
Kobold	0.3	$0.8 \times 0.3 = 0.24$	70.6
GEM	0.75 (con diffusori) ⁴	$0.8 \times 0.75 = 0.6$	176.5
Fri-el	0.316	$0.8 \times 0.316 = 0.25$	74.4
Verdant power	0.336	$0.8 \times 0.336 = 0.27$	79.1
Valore medio			101.3

Si riportano i dati di producibilità relativi alla produzione complessiva stimata con il metodo delle fattorie, ottenuto sommando le produzioni relative a tutte le aree di installazione ipotizzate.

⁴per l'apparente superamento del limite di Betz si veda la nota 2.

Tabella 28. Stima energia annua prodotta – Metodo delle fattorie.

Sistema	Densità di installazione (unità/km²)	Potenza installata (MW)	Energia annua prodotta (GWh)
MCT SeaGen	40	280.2	180.
Kobold	36	159.1	101.5
GEM	23	249.2	161
Fri-El	2.5	15.5	8.8
Verdant Power	16	108.1	69
		Produzione media annua	104.0

Si nota che la seconda stima fornisce un valore leggermente maggiore della produzione media della prima stima basata sul metodo del flusso di energia.

Si nota che le stime relative al sistema Fri-el presentano una notevole differenza, in conseguenza delle elevate dimensioni di ingombro assunte per tale sistema.

Si osserva che le stime di produzione sono soggette alle limitazioni connesse con le assunzioni relative alle curve di potenza considerate. In particolare, per i sistemi presi in esame, sono state stimate curve di potenza teorica con andamento cubico fino alla potenza nominale e con un tratto costante per velocità superiori. L'effettivo comportamento dei sistemi di conversione è fortemente dipendente dalle caratteristiche della curva di potenza, tanto per il comportamento alle potenze prossime alle condizioni nominali, quanto per le caratteristiche di avviamento (velocità di *cut-in*, minima velocità di inizio stabile di produzione di potenza). Le stime di produzione risentono dunque delle incertezze connesse con le curve di potenza assunte, che hanno un valore indicativo di massima del comportamento delle diverse tipologie di sistemi di conversione; le assunzioni sulla tipologia di curve di potenza conducono a risultati validi solo nell'ambito di una stima preliminare di produzione volta ad individuare le potenzialità generali di sfruttamento delle correnti dello Stretto di Messina. Si nota, inoltre, che le stime condotte non tengono conto delle eventuali interruzioni di funzionamento per interventi manutentivi o altre sospensioni della produzione.

C'e' inoltre da precisare che non si e' tenuto conto della limitazione connessa con la profondita' dei vari siti poiche' non e' assestata la massima profondita' permissibile per ogni sistema. E' tuttavia chiaro che per i sistemi che devono essere fissati con le loro fondazioni al fondo del mare (Ad esempio SEAGEN, Verdant Power), profondita' maggiori di 40 metri presentano difficolta' e costi notevoli di installazione e manutenzione che ne limitano significativamente il campo di impiego. Si e' pero' preferito ipotizzare una profondita' di installazione simile ed uguale per tutti rimuovendo questa limitazione e confrontando quindi l' energia complessivamente producibili dai vari sistemi considerati ipotizzando che la profondita' massima sia di 40 metri per tutte le aree considerate.

Infine, devono essere tenuti in conto tutti gli aspetti connessi ai costi che possono essere significativamente diversi tra un sistema e l'altro indipendentemente dalla loro capacita' di produzione energetica. In particolare vanno tenuti in conto i costi di installazione e quelli di manutenzione nonche' va tenuto in conto l'impatto sulla navigazione e sulla pesca. In altre parole il criterio finale per la scelta di un sistema rispetto ad un altro e' guidato da fattori che possono invertire totalmente l'ordine di scelta rispetto al solo criterio della massima producibilita' energetica.

Bibliografia

- [1] Black & Veatch Group, "Tidal Stream Energy Resource Assessment" England, 2004.
- [2] "The Exploitation of Tidal and Marine Current" Commission of European Community, Joule Program EUR 16683 EN, 1996.
- [3] I.G. Bryden, "Optimising the Performance (Electrical and Economic) of Tidal Current Turbines: Final Report" Joule Program 2001.
- [4] "The Development and Market potential for Tidal Current Power in Scotland - Final Report" Robert Gordon University, Scottish Enterprise 2002.
- [5] F.S. Stoddard D.M. Eggleston, *Wind Turbine Engineering Design*. Dordrecht , Netherlands: Kluwer Academic Publishers , 1987.
- [6] (2012) MCT - Marine Current Turbine. [Online]. <http://www.marineturbines.com/Contact-Marine-Current-Turbines>
- [7] Domenico P. Coiro and Fabrizio Nicolosi, "Numerical and Experimental Tests for the Kobold Turbine" in *SINERGY Symposium*, Hangzhou, Republic of China, 1998.
- [8] Domenico P. Coiro et al., "Harnessing marine current energy with tethered submerged systems: experimental tests and numerical model analysis of an innovative concept." in *IECCP*, Capri, 2010.
- [9] Dr. Gerard J.W. van Bussel, "The science of making more torque from wind: Diffuser experiments and theory revisited." *Journal of Physics: Conference Series 75 (2007)*, 2007.
- [10] Josh Reinecke, T.W. von Backström, and G. Venter, "Effect of a Diffuser on the Performance of an Ocean Current Turbine".
- [11] D.P. Coiro, F. Scherillo, R. Familio, U. Maisto, and G. Troise, "Experimental test campaign on an innovative device to harness clean energy from tidal and river current." in *IECCP*, Capri, Italy, 2010.
- [12] Seokkoo Kang, Iman Borazjani, Jonathan A. Colby, and Fotis Sotiropoulos, "Numerical simulation of 3D flow past a real-life marine hydrokinetic turbine." *Advances in Water Resources*, no. 39, pp. 33-43, 2012.
- [13] N.O. Jensen, "A note on wind generator interaction" Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Risø-M-2411, 1983.
- [14] "Tavole di Marea 2004" Istituto Idrografico della Marina, Genova, 2003.
- [15] F. Vercelli, "Il regime delle correnti e delle maree nello Stretto di Messina" Osservatorio Geofisico di Trieste, Venezia, 1925.
- [16] *Guideline for the Certification of Ocean Energy Converters Part 1: Ocean Current Turbines.:* Geermanischer Lloyd, 2005.