



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Analisi delle attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento della
energia marina da correnti marine

Paolo Monti, Giovanni Leuzzi.



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

ANALISI DELLE ATTUALI TECNOLOGIE ESISTENTI PER LO SFRUTTAMENTO DELLA ENERGIA
MARINA DA CORRENTI MARINE

Paolo Monti, Giovanni Leuzzi (DICEA)

Settembre 2011

Report Ricerca 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 Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Si ringrazia il Servizio Mareografico dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) per aver reso disponibile attraverso il sito <http://www.idromare.it/> i dati registrati dalle boe della rete ondametria nazionale (RON).

ANALISI DELLE ATTUALI TECNOLOGIE ESISTENTI PER LO SFRUTTAMENTO DELLA ENERGIA MARINA DALLE CORRENTI MARINE

Sommario

1. Introduzione	1
2. Convertitori di energia da correnti marine: classificazione e tipologie	3
2.1 Cenni storici.....	3
2.2 Tipi di impianti di produzione dell'energia	4
2.3 Turbine ad asse orizzontale	5
2.4 Turbine ad asse verticale	15
2.5 Dispositivi oscillanti.....	20
2.6 Dispositivi ad effetto venturi	22
2.7 Dispositivi magnetofluidodinamici.....	22
3. Conclusioni.....	24
Bibliografia	25
Riferimenti Internet.....	25

1. INTRODUZIONE

La potenza di una corrente idrica di velocità v , densità ρ , incidente su un'area A normale ad essa è esprimibile come:

$$P = \frac{1}{2} \iint_A \rho v^3 dA = \frac{1}{2} \alpha \rho V^3 A$$

essendo α il coefficiente di Coriolis, rapporto tra la media cubica della velocità ed il cubo della media lineare V sulla sezione, ed è pari ad uno nel caso di corrente uniforme e lievemente maggiore di uno negli altri casi.

Poiché la densità dell'acqua è circa 800 volte quella dell'aria le macchine destinate ad intercettare tali potenze, derivate dai generatori eolici, possono, a parità di altre condizioni, avere dimensioni più contenute rispetto a questi: ad esempio una corrente idrica di solo 1 ms^{-1} possiede una potenza di circa 500 Wm^{-1} .

Le correnti marine o fluviali sono inoltre, nelle quasi totalità dei casi, unidirezionali o bidirezionali e pertanto non sono richiesti i complessi dispositivi di allineamento dell'angolo di imbardata tipici dei generatori eolici.

L'evoluzione nel tempo di tali correnti è facilmente prevedibile ed il fenomeno è addirittura deterministico nel caso delle correnti dovute alle maree astronomiche. L'utilizzo dell'energia prodotta sarà pertanto facilmente gestibile nell'ambito della produzione di base della rete elettrica integrata nazionale. Nel caso invece di reti elettriche locali isolate, quali quelle delle isole per le correnti marine o delle comunità montane per quelle fluviali, occorrerà predisporre un sistema di accumulo di energia per adeguare il diagramma di produzione a quello del carico richiesto. In entrambi i casi data la grande disponibilità di acqua sembrerebbe opportuno ricorrere per l'accumulo a piccole centrali idroelettriche reversibili, o ad accumulatori elettrochimici nei casi di piccole potenze. Nei casi poi di sistemi isolati in cui fosse economico produrre più energia di quella richiesta, si potrebbe pensare ad esportarla sotto altre forme, come ad esempio producendo idrogeno.

L'energia delle correnti idriche è a buona ragione considerata una fonte rinnovabile. Le dissipazioni legate alle correnti di marea dovute a cause naturali provocano un aumento del periodo diurno di rotazione terrestre stimabile, in base ad osservazioni astronomiche, ad un secondo per secolo. Da stime qualitative e da osservazioni degli ultimi 40 anni, in cui sono entrate in funzione le grosse centrali mareali di St. Malo ed Annapolis, sembrerebbe che tale ordine di grandezza dell'aumento del periodo diurno non verrebbe modificato da uno sfruttamento anche massiccio di tale fonte di energia. Ciò è dovuto alla debolezza delle forze di attrazione che la luna con la sua piccola massa ed il sole con la sua grande distanza esercitano sulla superficie terrestre a confronto con la forza di gravità terrestre. Il fenomeno è quindi irrilevante rispetto a quanto presumibilmente è avvenuto nel passato sul nostro pianeta in cui il grande spostamento di masse dovute all'attrazione terrestre e la conseguente dissipazione ha fatto aumentare il periodo di rotazione della luna fino a coincidere col suo periodo di rivoluzione intorno alla terra sì che noi ne vediamo sempre la stessa faccia.

Per quanto riguarda le maree meteorologiche e le correnti fluviali esse sono dovute in ultima analisi all'irraggiamento solare, fonte questa ritenuta inesauribile, o comunque indipendente dal suo utilizzo.

Più consistente può essere l'impatto locale di un prelievo massiccio di energia in zone confinate quali spesso sono quelle di interesse. Sono stati fatti studi teorici al riguardo prendendo in esame canali dalla geometria piuttosto semplice bidimensionale e si è concluso che un prelievo del 10% dell'energia disponibile comporta una riduzione della velocità della corrente inferiore al 3% (Bryden et al., 2004; Bryden & Couch, 2006). D'altronde un maggior prelievo di energia sarebbe antieconomico in quanto ad un massiccio aumento nel numero dei generatori non corrisponderebbe un altrettanto grande aumento della potenza prelevata trovandosi tali generatori ad operare sulla scia dei precedenti. In ogni caso va studiato attentamente l'effetto locale che tali generatori provocano sull'ambiente marino in generale, sui fenomeni di erosione, sul deposito di sedimenti, sulla modifica delle correnti costiere, sull'habitat naturale, sui flussi migratori di pesci e cetacei. La bassa velocità di rotazione delle pale (inferiore a 12 ms^{-1} all'estremità), comparata con quella dei propulsori marini, fa sì che difficilmente si abbia il fermento di animali marini o si introducano rumori fastidiosi in quanto ogni cura sarà adottata ad evitare la cavitazione. Anche le potenze in gioco che nel caso ottimale si aggirano sui 4 kWm^{-2} sono piccola cosa rispetto ai 100 kWm^{-2} tipici dei propulsori navali (Fraenkel, 2007).

I dispositivi in questione possono entrare in conflitto con altre utilizzazioni del mare in particolar modo con la navigazione, con la pesca, con esigenze di carattere militare, esigenze queste che andranno valutate caso per caso. Non è comunque escluso che in talune circostanze tali dispositivi potrebbero avere anche ripercussioni positive sull'ambiente per esempio in prossimità di aree protette estendendo le zone con divieto di pesca o creando situazioni favorevoli al proliferare di molluschi od altro.

Limitati pure in rapporto a quelli legati alla navigazione marittima sono gli effetti di inquinamento dovuti a dispersione di lubrificanti o all'inquinamento per rottami.

Per ciò che riguarda il rapporto tra energia prodotta ed energia utilizzata (ERoEI Energy Return on Energy Invested) uno studio preliminare di Clarke (2006) stima che sia lo stesso di quello dei generatori eolici e cioè che essi producano l'energia utilizzata per la costruzione nei primi 4-6 mesi di funzionamento.

valutazione di impatto e adattamento alle fluttuazioni climatiche (Giorgi 2006a). Il principale vantaggio che si ha nell'uso di MCR rispetto ai modelli climatici globali (MCG) è l'ottimizzazione delle risorse di calcolo rispetto alla possibilità di incrementare la risoluzione spaziale e quindi di migliorare la descrizione dell'interazione fra la dinamica atmosferica e la superficie, sia dal punto di vista delle interazioni aria-mare che dal punto di vista dell'interazione con la topografia e della descrizione degli effetti dell'uso del suolo.

Gli studi nel campo della modellistica del clima hanno caratterizzato la regione Euro-Mediterranea come una delle aree in cui la maggior parte scenari di stabilizzazione della concentrazione di CO₂ sopra 400ppm sono suscettibili di produrre effetti di rilievo sui regimi pluviometrici oltre fluttuazioni della temperatura di ampiezza superiore a quella registrata durante gli ultimi secoli (Giorgi et al 2004, Dequé et al. 2005). In uno scenario di riscaldamento, il potenziale inaridimento della regione Euro-Mediterranea è per lo più attribuito ad un spostamento verso nord dei disturbi sinottici provenienti

dall'Atlantico, in grado di generare condizioni atmosferiche più stabili durante la maggior parte dell'anno, soprattutto in estate (Giorgi e Lionello, 2008).

2. CONVERTITORI DI ENERGIA DA CORRENTI MARINE: CLASSIFICAZIONE E TIPOLOGIE

2.1 Cenni storici

Fino a pochi anni fa, gli sforzi per ricavare energia dalle maree si sono concentrati sui sistemi che usano impianti a sbarramento di marea, dei quali il più importante è stato l'impianto da 240 MW installato a La Rance, vicino St. Malo, in Francia (Figura 1). La costruzione di questo impianto, durò 7 anni e fu completata nel 1967. Nella diga sono installate 24 turbine a bulbo, ciascuna di 5.4 m di diametro e 10 MW di potenza. Un impianto simile, ma più piccolo (20 MW) fu attivato nel 1984 ad Annapolis Royal, sulla baia di Fundy, in Canada.

La tecnologia degli impianti a sbarramento di marea è una tecnologia matura, che si basa sulla lunga esperienza delle costruzioni marittime e delle tradizionali centrali idroelettriche, è affidabile e potenzialmente promettente, ma comporta alti investimenti di capitale, lunghi tempi di realizzo ed un forte impatto ambientale. Più recentemente l'attenzione dei governi, delle organizzazioni internazionali e delle imprese private si è spostata sui meno invasivi generatori a corrente di marea. Tali dispositivi in grado di convertire la potenza della corrente idrica in potenza meccanica, dispositivi analoghi ai generatori eolici, a differenza delle turbine idrauliche tradizionali delle centrali idroelettriche utilizzano prevalentemente la parte cinetica di tale corrente con modesti salti di pressione. Poiché il fluido dovrà essere restituito a velocità non nulla la massima potenza teorica è pari ai $16/27=59.3\%$ della potenza della corrente (Betz, 1913). Il teorema di Betz è stato ricavato ipotizzando che le traiettorie rimangano rettilinee nel passaggio attraverso la turbina e la pressione sia uniforme su ciascuna sezione; più recenti studi (Gorban et al., 2001), tenendo conto della curvatura delle traiettorie e dell'effettiva distribuzione della pressione, limitano ulteriormente l'efficienza a circa il 40%. Nei generatori finora costruiti e per i quali siano stati resi noti i dati raramente si raggiungono efficienze dell'ordine del 25%, ma trattandosi di tecnologie appena agli inizi c'è da sperare in un rapido miglioramento nei prossimi anni.



Figura 1. Centrale da 240 MW di La Rance, St. Malo, Francia.

2.2 Tipi di impianti di produzione dell'energia

I principali dispositivi di conversione dell'energia di una corrente fluida in energia meccanica e quindi in elettrica, attualmente in uso, possono essere classificati in base al principio di funzionamento in:

- **Turbine ad asse orizzontale**
- **Turbine ad asse verticale**
- **Dispositivi ad ala oscillante**
- **Dispositivi ad effetto Venturi**
- **Zattere articolate instabili**
- **Dispositivi magnetofluidodinamici**

Altre classificazioni potranno essere condotte in base ad altri criteri quali i sistemi di ancoraggio o di fissaggio al fondo, il diverso impatto ambientale o l'essere di maggiore o minore intralcio ad altre attività marittime o fluviali quali la navigazione o la pesca, il tipo di macchina elettrica utilizzata ed il conseguente tipo di corrente elettrica prodotta.

2.3 Turbine ad asse orizzontale

Sono i dispositivi che utilizzano tecnologie più tradizionali, derivate sia dalle conoscenze sui generatori eolici sia dalla ben più lunga conoscenza sui propulsori marini. Hanno un basso impatto ambientale potendo, in linea di principio, risultare completamente sommersi ad una profondità tale da non costituire intralcio alla navigazione, anche se nei principali prototipi finora costruiti vi è sempre una parte affiorante per renderne facile sia l'installazione che la manutenzione.

Nella maggior parte dei casi si tratta di gruppi turbine-generatore ad asse orizzontale montati su pali verticali conficcati sul fondo ed emergenti in maniera da montare il gruppo fuori dell'acqua e poi farlo scorrere verticalmente tramite cremagliera fino a portarlo all'affondamento voluto. La turbina può essere accoppiata direttamente ad un normale generatore attraverso un organo di trasmissione in genere costituito da una scatola di ingranaggi moltiplicatori, o utilizzare un diverso schema di trasmissione di energia, l'energia elettrica prodotta è poi trasmessa a terra attraverso cavi isolati. L'adeguamento della turbina ai diversi regimi di velocità, al fine del massimo rendimento, ed all'inversione del moto si realizza variando il passo dell'elica.

In altri casi si utilizzano dispositivi ancorati sul fondo e sospesi a galleggianti o sospesi nella corrente stessa a mo' di aquiloni.

I principali dispositivi finora costruiti utilizzando turbine ad asse orizzontale hanno rendimenti complessivi intorno al 15 – 20% e vengono qui di seguito elencati.

DeltaStream Turbine. Il dispositivo **DeltaStream Turbine** (Figura 2) è stato sviluppato dall'inglese "Tidal Energy Ltd." Con larga esperienza nei propulsori marini. Il prototipo da 1.2MW consiste in tre turbine ad asse orizzontale a tre pale ognuna di 15 m montate su una struttura triangolare adagiata o ancorata sul fondo, struttura con baricentro molto basso ai fini della stabilità. Tali strutture completamente sommerse non sono di intralcio alla navigazione, inoltre la bassa velocità di rotazione, in confronto con gli altri generatori di marea, comporta un minimo impatto sulla vita marina. Le pale del rotore possono essere disposte a bandiera in caso di correnti eccessive. Le prove su tale dispositivo sono iniziate nell'estate 2009 in Scozia.

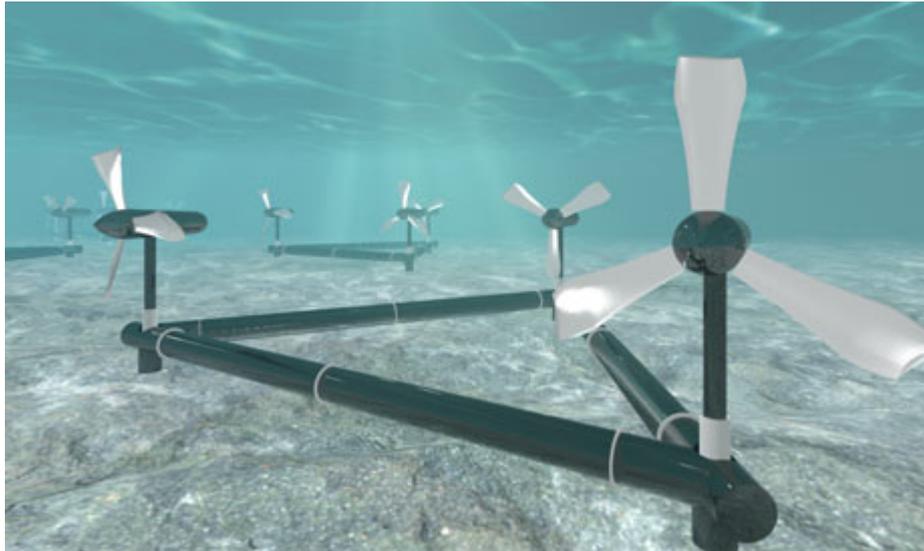


Figura 2. Impianto DeltaStream (<http://www.tidalenergyltd.com/technology.htm>).

Evopod Tidal Turbine. L' Evopod Tidal Turbine (Figura 3) è stato sviluppato dall'inglese "Ocean Flow Energy Ltd.". Consiste in una turbine a cinque pale ad asse orizzontale montata su una struttura galleggiante ancorata sul fondo. L'ancoraggio è tale da assicurare l'allineamento della macchina nel verso della corrente. Un modello in scala 1/10 è stato provato a maggio 2009 nello stretto di Strangford nell'Irlanda del nord.

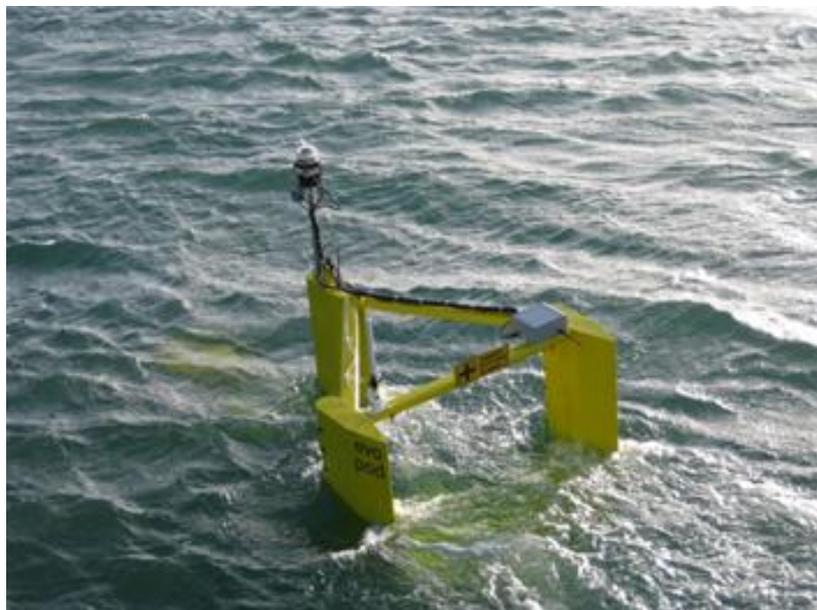


Figura 3. Impianto Evopod Tidal Turbine

(<http://www.oceanflowenergy.com/development-status.htm>).

Free Flow Turbines. Il Free Flow Turbine (Figura 4) è stato sviluppato dalla statunitense Verdant Power Ltd. Consiste in una turbina ad asse orizzontale a tre pale di 4.68 m di diametro che è stato provato sotto un pontone dell' East River nella città di New York ed ha generato 1MWh di elettricità al giorno. Nel 2008 la Verdant Power Ltd. si è assicurata un contratto di 1.15 milioni di dollari dal dipartimento Sustainable Development Technology of Canada per sviluppare il Cornwall Ontario River Energy Project che nel 2013 dovrà fornire 15 MW in rete.



Figura 4. Free Flow Turbine (<http://www.verdantpower.com>).

Lunar Energy Tidal Turbine. Sviluppata dall'inglese Lunar Energy Ltd., la sua struttura consiste in una turbina da 1 MW ad asse orizzontale, bidirezionale di diametro di 11.5 m disposta in un condotto di 19.2 m di lunghezza e di 15 m di diametro poggiato sul fondo in quanto stabile per il proprio peso (Figura 5). Il condotto è stato inserito per rendere massima l'estrazione di energia dalla corrente. Tali dispositivi sono ancora in fase di sviluppo e nessun prototipo è ancora stato costruito, ma la Lunar Energy Ltd. ha recentemente firmato un contratto da 500 milioni di sterline per installare 300 turbine in prossimità delle coste della Corea.

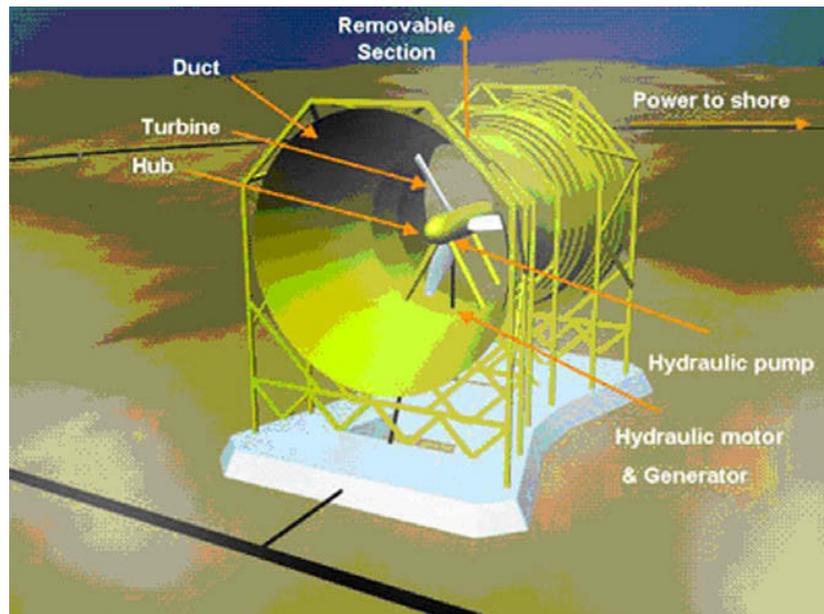


Figura 5. Lunar Energy Tidal Turbine (<http://www.lunarenergy.co.uk/News.php>).

Marine Current Turbines. Il prototipo a scala naturale di turbina con singolo rotore **Sea Flow**, da 300 kW, è stato sperimentato a partire dal maggio 2003 a 3 km a NE al largo di Lynmouth nella costa nord di Devon in Cornovaglia per fornire energia per operazioni di discarica (Figura 6). E' stata il primo convertitore di energia al mondo operante offshore ed è tutt'ora quello di maggior potenza operante in tali condizioni. Le prestazioni riportate sono state migliori del 27% rispetto alle attese. Nel 2005 con l'aggiunta di ulteriore strumentazione ha fornito energia in modo completamente automatizzato. Nell'ottobre del 2009 è stato posto fuori servizio ed è stato sviluppato un nuovo modello chiamato **Seagen** da 1.2 MW (Figura 7), che è stato istallato nello stretto di Strangford in Ulster e connesso alla rete elettrica nell'Irlanda del nord.

Consiste in due turbine ad asse orizzontale controrotanti di 16 m di diametro connesse attraverso una scatola di ingranaggi che moltiplicano il numero di giri al generatore elettrico. Queste due unità sono montate su un'estensione alare ai due lati di un palo tubolare in acciaio di 3 m di diametro infisso sul fondale e l'intera struttura può scorrere lungo il palo fino ad emergere allo scopo di rendere semplice ed affidabile il montaggio e la manutenzione. Il passo dell'elica del rotore può essere regolato per fornire il massimo rendimento durante il flusso e riflusso di marea. Dal gennaio 2009 opera con successo alla piena potenza di 1.2 MW con correnti 1.4 ms^{-1} .



Figura 6. Sea Flow (<http://www.marineturbines.com>).

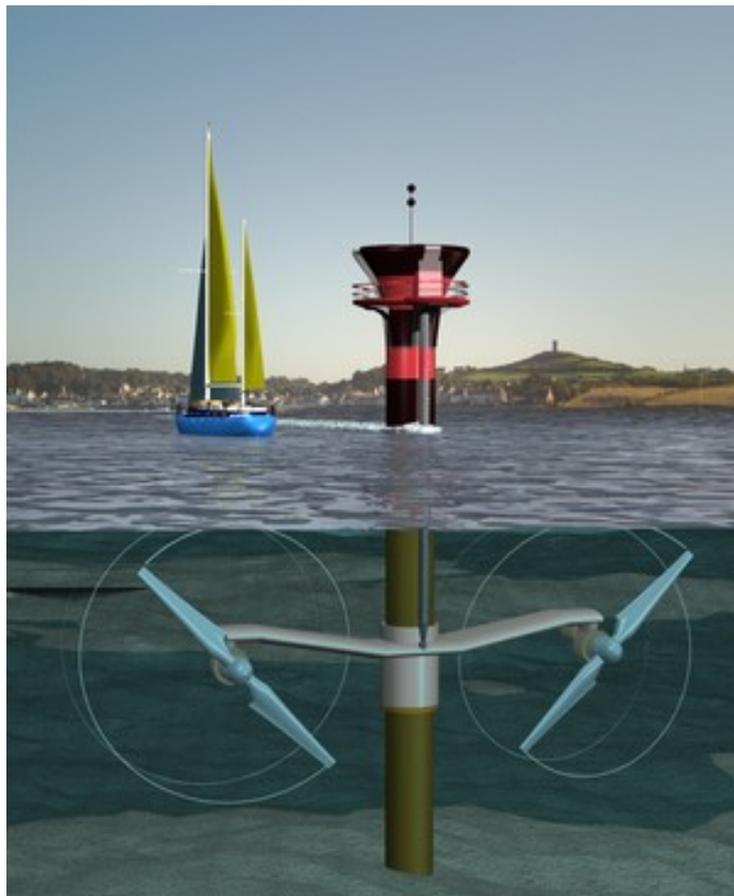


Figura 7. Seagen (<http://www.marineturbines.com>).

Morild II. L'impianto galleggiante Morild II (Figura 8), realizzato dalla norvegese Hydra Tidal Energy, è dotato di 4 turbine dal diametro di 23 metri, calettate su due assi distinti, con due pale in legno laminato ciascuna, per una potenza totale di 1.5 MW. E' stato posizionato nelle acque delle isole Lofoten, lungo la costa nordoccidentale norvegese, è il maggiore al mondo per lo sfruttamento delle correnti marine ed è stato inaugurato il 23 novembre scorso e connesso alla rete elettrica norvegese. Le turbine sono agganciate ad una struttura galleggiante sotto il pelo dell'acqua, ma possono essere calate a diverse profondità, in modo da sfruttare nel modo migliore le correnti marine. L'impianto è progettato per semplificare il più possibile le operazioni: l'attività ordinaria sarà gestita a distanza, e la manutenzione si potrà effettuare portando le turbine in superficie. I primi due anni sono considerati una fase sperimentale, per verificare la tecnologia e valutarne i risultati prima della commercializzazione.



Figura 8. Dispositivo Morild II (<http://www.hydratidal.com>).

Neptune Tidal Stream Device. Il Neptune Tidal Stream Device (Figura 9) è stato sviluppato dall'inglese Aquamarine Power Ltd., sviluppa una potenza di 1.4 MW e consiste in una coppia di rotori a tre pale controrotanti ad asse orizzontale montati su una struttura monopalo.

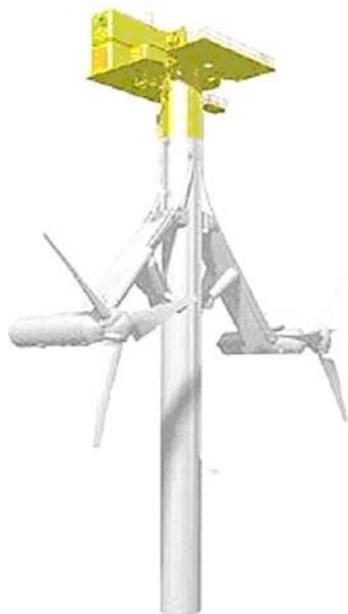


Figura 9. Neptune Tidal Stream Device (<http://www.aquamarinepower.com>).



Figura 10. Turbina Nereus (<http://www.peswiki.com/index.php>).

Nereus and Solon Tidal Turbines. Le turbine Nereus e Solon Tidal sono state sviluppate dalla Atlantis Resource Corporation Ltd. di Singapore. La turbina Nereus Tidal (Figura 10) per acque basse (meno di 25 m) è una turbina ad asse orizzontale di 400 kW molto robusta che può operare in presenza di detriti, è costituita da una serie di pale disposte su un nastro scorrevole attorno a due cerniere, è stata testata con successo nel luglio 2008 e connessa alla rete elettrica dell'Australia, può operare nei fiumi. La turbina Solon Tidal (Figura 11) per acque profonde è una turbine ad asse orizzontale intubata da 500 kW che è stata provata con successo nell'agosto 2008.



Figura 11. Turbina Solon Tidal (<http://www.peswiki.com/index.php>).



Figura 12. Turbina Open-Hydro (<http://www.openhydro.com/home.html>).

Open Centre Turbine. La irlandese Open-Hydro Ltd. ha sviluppato la Open Centre Turbine (Figura 12). La sua tecnologia consiste in un rotore di 6 m di diametro che si muove lentamente dentro uno statore solidale ad un condotto ed un generatore elettrico da 250 kW. La Open-Hydro Ltd. È la prima società a fornire energia alla rete nazionale Britannica e la Open Centre Turbine è stata installata dall' EMEC. La società ha investito 5 milioni di euro per il progetto e la costruzione di un tipo speciale di chiatta per l'installazione di queste turbine e nell'ottobre 2008 è stata scelta dall'EDF francese come suo principale fornitore.

TidEl Stream Generator. Il TidEl Stream Generator (Figura 13) è stato sviluppato dalla britannica SMD Hydrovision Ltd. Il generatore TidEl consiste in due rotori controrotanti ciascuno da 500 kW di 15 m di diametro a passo fisso. La potenza nominale di 1 MW si raggiunge con correnti di 1.3 ms^{-1} mentre con meno di 0.7 ms^{-1} il sistema cessa di operare. L'orientamento dell'apparato è assicurato dal sistema di

ancoraggio sul fondo e tutto il dispositivo galleggiante è libero di fluttuare con la corrente in acque profonde dove non arriva la luce in modo da evitare la manutenzione alla carena, mentre per la normale manutenzione programmata, prevista ogni due anni, si può allungare la catena di ancoraggio fino a portare il tutto in superficie. E' stato testato con successo un modello in scala 1/10.

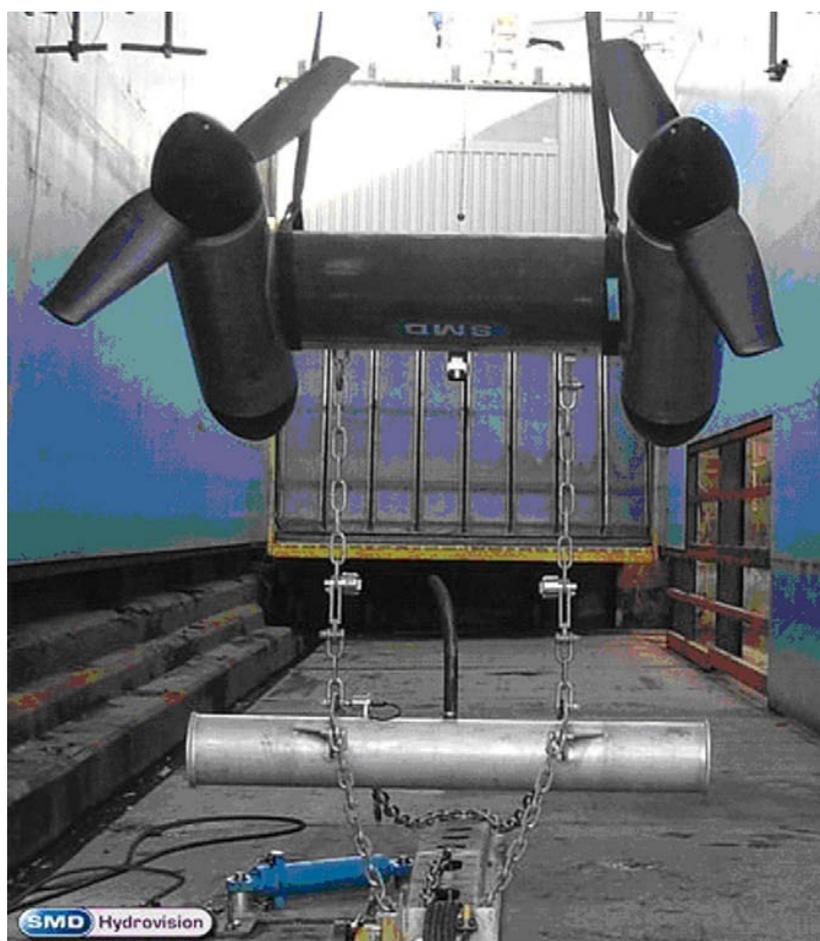


Figura 13. TidEl Stream Generator (<http://smd.co.uk/>).

Tidal Stream Turbine. La Tidal Stream Turbine da 300 kW è una turbina a tre pale ad asse orizzontale sviluppata dalla società norvegese Hammerfest Strøm (Figura 14) e fu installata a Kvalsundet sulla costa nord della Norvegia nel settembre 2003 e divenne operativa nel novembre dello stesso anno divenendo così il primo generatore a corrente di marea al mondo collegato alla rete elettrica nazionale. La società sta sviluppando un nuovo dispositivo da 1 MW denominato HS 1000 che viene testato nell'anno in corso (2011) all'European Marine Energy Center (EMEC) di Falls of Warress nei pressi dell'isola di Eday nelle Orcadi in Scozia.



Figura 14. Tidal Stream Turbine (<http://www.hammerfeststrom.com/>).



Figura 15. Underwater Electric Kite (<http://uekus.com/>).

Underwater Electric Kite. La Underwater Electric Kite dell'omonima società americana è una turbina convenzionale ben sperimentata per il flusso di marea (Figura 15). La turbina è sospesa nel flusso di marea e ci sono progetti per una resa nominale fino a 1 MW.

2.4 Turbine ad asse verticale

Le turbine ad asse verticale, o lievemente inclinato nei dispositivi galleggianti, sono derivate dalle turbine eoliche Darreius e presentano alcuni vantaggi rispetto a quelle ad asse orizzontale quali un miglior rendimento, la omnidirezionalità sul piano orizzontale, la possibilità di avere parte dei dispositivi quali ad esempio il moltiplicatore di giri e la parte elettrica fuori dall'acqua, ed una maggiore semplicità di montaggio e manutenzione. Per contro hanno alcuni difetti quali una coppia non costante durante l'intero ciclo il che comporta la presenza di vibrazioni e talvolta l'avviamento alla rotazione non è spontaneo. In genere poi avendo cospicue parti emerse hanno un maggiore impatto visivo ed ambientale.

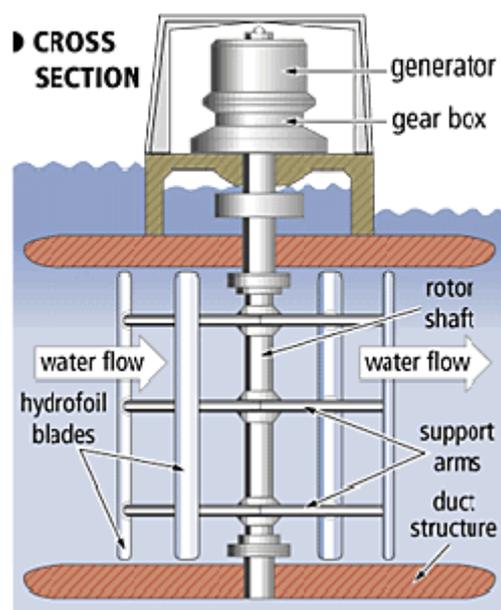


Figura 16. Dispositivo Blue Energy

(http://peswiki.com/index.php/Directory:Blue_Energy).

Blue Energy Canada. La tecnologia portata avanti da Blue Energy si basa sull'applicazione della turbina idraulica Davis, che rappresenta l'evoluzione della turbina a vento Darreius ad asse verticale. L'obiettivo a lungo termine è di installare molte di queste turbine, a formare uno 'steccato da marea' (Figura 16), in cui la struttura 'a steccato' può raddoppiarsi come per una strada rialzata, consentendo così

una ripartizione dei costi. La società ha sperimentato finora sei impianti di diverse dimensioni; la resa migliore è stata di 100 kW.

Gorlov Helical Turbine. La turbine ad asse verticale Gorlov ad elica (Figura 17) è stata sviluppata dalla GCK Technology Inc. degli USA. Utilizza tre pale ripiegate ad elica che assicurano una coppia costante durante l'intero ciclo, quindi una sensibile riduzione delle vibrazioni ed un aumento dell'efficienza che ha raggiunto valori del 35% tra i più elevati dei generatori a corrente idrica. Un modello in scala da 1m di diametro è stato testato con successo nel luglio 2001.



Figura 17. Turbina elicoidale Gorlov (<http://www.gcktechnology.com/GCK/pg1.html>).

Turbina Kobold. La turbina ad asse verticale Kobold della società italiana Ponte di Archimede è stata progettata presso il Dipartimento di Progettazione Aeronautica (DPA) dell'Università "Federico II" di Napoli, ed è attualmente la prima di quelle ad asse verticale ad essere installata per lo sfruttamento delle correnti di marea (Figura 18). La turbina Kobold ha un rotore dotato di tre pale disegnate con un profilo ad hoc esente da cavitazione e dotate di un originale sistema di contrappesi che assicura automaticamente il miglior angolo di incidenza durante l'intero ciclo e che permetta l'avviamento spontaneo della rotazione (Coiro et al., 2005).



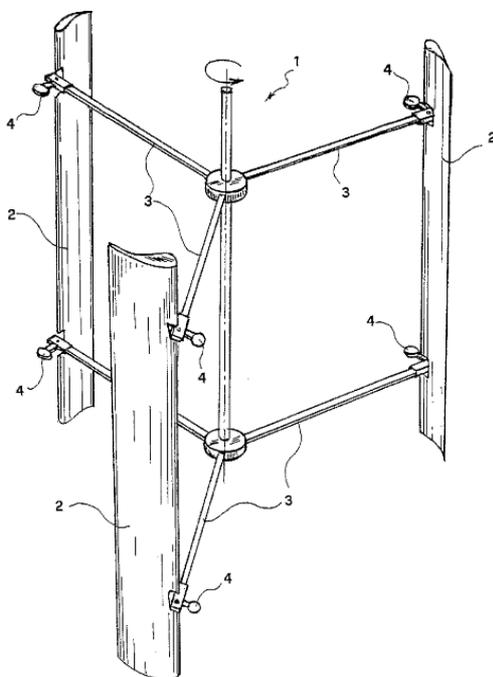
Figura 18. Il generatore a corrente di marea sullo stretto di Messina (<http://www.pontediarchimede.it/>).

La turbina Kobold (Figura 19) è stata progettata per raggiungere il livello più elevato possibile sia di salvaguardia ambientale, sia di efficienza, come pure rispettare le necessità di bassi costi di costruzione e di manutenzione. La progettazione fluidodinamica e strutturale della turbina è stata condotta in seguito a numerose prove nella galleria del vento presso il DPA e calcoli numerici per mezzo di codici di calcolo appositamente sviluppati. L'impianto completo è composto dalla turbina prototipo e da un generatore elettrico. L'intero sistema è montato su una piattaforma galleggiante del diametro di 10 m ancorata al fondale per mezzo di 4 blocchi in conglomerato cementizio. Il moltiplicatore di giri meccanico ha un rapporto di moltiplicazione di 1:161; il generatore elettrico è di tipo senza spazzole, trifase, sincrono, quattro poli, capace di generare una potenza nominale di 160 kVA ed è connesso ad una unità di controllo in grado di fornire energia alla rete. Il rotore ha un diametro di 6 m ed è costituito da tre pale diritte e parzialmente libere di oscillare sotto l'azione delle forze idrodinamiche e di massa, garantendo sempre una elevata efficienza idrodinamica. Le pale hanno un'apertura di 5 m ed una corda di 40 cm; esse sono dotate di un profilo appositamente progettato presso il DPA e denominato HL-18 in grado di assicurare elevate efficienze

idrodinamiche ed al tempo stesso evitare il problema della cavitazione. Ogni pala è sostenuta e connessa all'albero di rotazione da due bracci opportunamente carenati.

WO 2005/024226 A1

(54) Title: VERTICAL AXIS WATER CURRENT TURBINE



(57) Abstract: Improved vertical axis hydraulic turbine comprising a rotor (1) equipped with at least three vanes (2), each of which is pivotally connected on said rotor (1), characterized in that the arrangement is such that during the rotation of the rotor (1) each vane (2) is apt to pivot within a range of from 80° to 90° with respect to the radial direction of the rotor (1). Elevated powers and ease of starting are obtained with the present turbine.

Figura 19. Turbina Kobold (Ufficio brevetti internazionale).

Allo stato attuale il sistema ha un'efficienza globale pari a circa il 23%: tale grado di efficienza è comparabile, se non addirittura superiore, a quello delle turbine eoliche che hanno avuto uno sviluppo applicativo più che trentennale. Un tale risultato è estremamente incoraggiante ai fini di un ulteriore approfondimento della ricerca. Sono in corso test migliorativi riguardanti i componenti per la trasmissione meccanica e la connessione con il generatore elettrico. Dai calcoli effettuati, l'efficienza risulterà ancora più elevata a seguito degli interventi programmati. E' stato infine condotto uno studio connesso alla quantità di energia che è possibile ottenere in un anno dal sito dove è attualmente installata la turbina, ossia nello Stretto di Messina, al largo di Ganzirri. Il risultato indica in circa 21.000 Kilowattora l'energia utile estraibile annualmente. In questa località, considerata l'estensione dell'area interessata dalle correnti, l'energia totale estraibile è pari a 538 GWh.

Il primo set di prove effettuato è stato finalizzato all'osservazione sistematica ed alla raccolta di dati sia in termini della velocità della corrente sia in termini di potenza prodotta dalla turbina. Si è osservato che anche con una corrente lenta (circa 1.2 m s⁻¹), il rotore inizia a ruotare velocemente senza nessun aiuto esterno. Nel grafico di Figura 20 sono riportate le curve di potenza sviluppate dalla turbina a diverse velocità della corrente marina previste con l'aiuto di un codice numerico appositamente sviluppato ed

in quello di Figura 21 è riportato l'andamento sperimentale del rendimento globale della turbina al variare del parametro non-dimensionale TSR (Tip-Speed-Ratio) = $\Omega R_{\text{raggio}}/V$. L'efficienza globale massima misurata è pari a circa 0.25: tale efficienza è comparabile con quella delle turbine eoliche. Si tratta pertanto di un progetto di successo che si sta riuscendo anche ad esportare: un secondo impianto di questo tipo è in corso di installazione in Indonesia e darà energia a un piccolo villaggio nell'isola di Lombok, ad est dell'isola di Bali, finora privo di corrente elettrica.

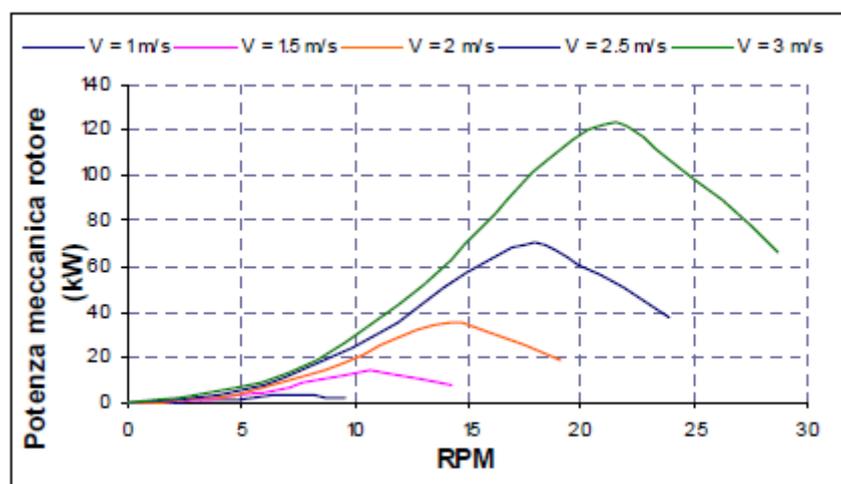


Figura 20. Curve di potenza generata dal rotore, previste numericamente, a differenti velocità della corrente marina.

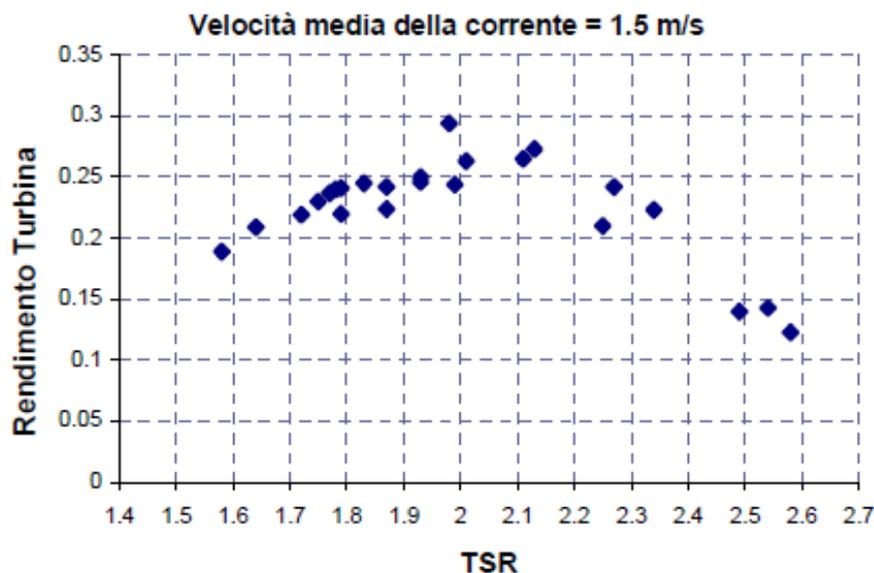


Figura 21. Misure sperimentali del rendimento della turbina.

(www.tecnosophia.org/documenti/Articoli/SessioneII/Coiro%20II.pdf).

2.5 Dispositivi oscillanti

Questi dispositivi sono dotati di alette che si muovono avanti e indietro in un piano perpendicolare alla corrente di marea, al posto delle pale rotanti. Uno di questi dispositivi utilizza dei pistoni per alimentare un circuito idraulico, che fa girare un motore idraulico e un generatore di energia.

Pulse Tidal Hydrofoil. Il Pulse Tidal Hydrofoil (Figura 22) è stato sviluppato dalla britannica Pulse Generation Ltd. Può operare in acque basse. Un prototipo è in fase di prova nell'estuario di Humber nel nord dell'Inghilterra. E' in fase di progetto e non sono stati forniti altri dati.

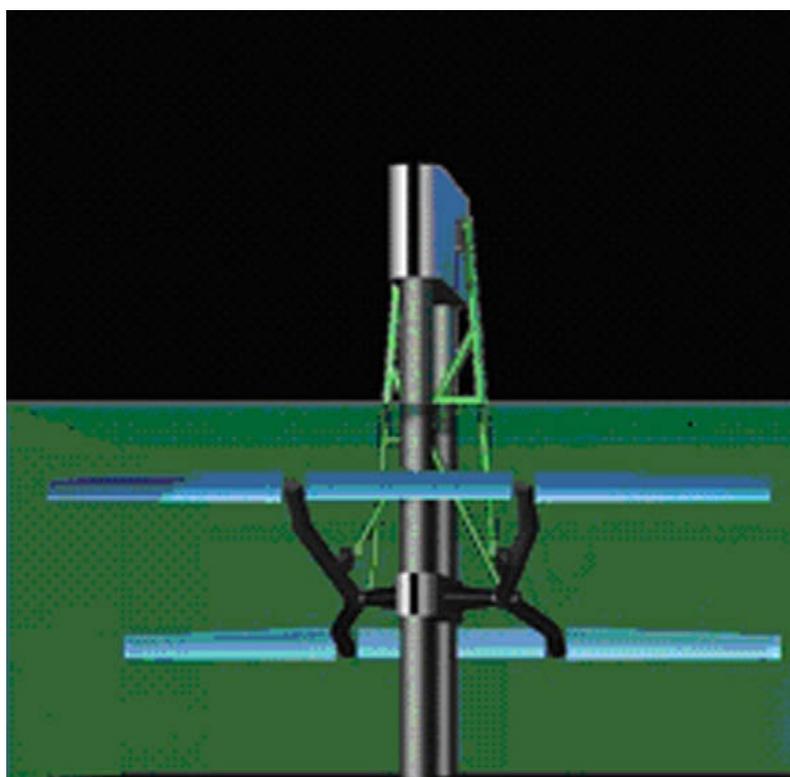


Figura 21. Pulse Tidal Hydrofoil (<http://www.oceanenergycouncil.com/>).

Engineering Business. L'impianto Stingray, dell'inglese Engineering Business Ltd., differisce dalla maggior parte degli altri sistemi, principalmente per due aspetti. In primo luogo, il prelievo di energia avviene per via idraulica; in secondo luogo, l'agente primario è un'ala oscillante invece di una turbina. Il prototipo da 150 kW è stato provato con successo a Yell Sound alle isole Orcadi nel settembre del 2002 e il suo sviluppo è stato sospeso per ragioni commerciali (Figura 22).

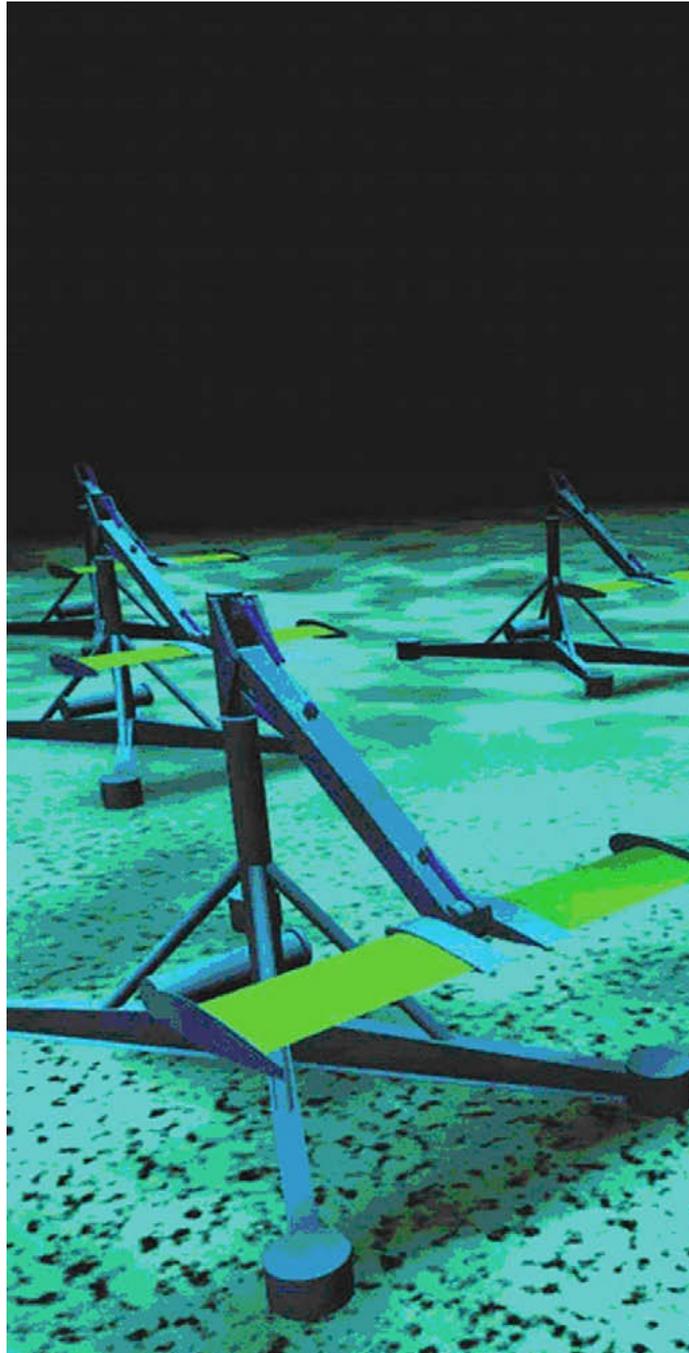


Figura 22. Stingray Tidal Energy Converter

(http://www.engb.com/services_09a.php).

Inocean. L'”anguilla meccanica” della Inocean è radicalmente diversa dagli altri dispositivi proposti per lo sfruttamento delle maree, ma molto simile agli sviluppi più recenti del concetto dell'attenuatore Hydra di Wavegen per lo sfruttamento delle onde. Si tratta di una zattera a struttura segmentata, che si basa sulle instabilità per produrre un movimento serpeggiante e consentire il prelievo di energia dal moto relativo dei segmenti (<http://www.inocean.no/inocean>).

2.6 Dispositivi ad effetto venturi

In questi dispositivi il flusso di marea viene convogliato in un condotto convergente che ne determina un aumento di velocità ed una diminuzione di pressione. Tale differenza di pressione può essere sfruttata in un circuito secondario mediante una turbina. L'efficienza del sistema è decisamente bassa, ma ha l'innegabile vantaggio che buona parte del sistema può essere installata a terra garantendo così un accesso relativamente semplice a tutte le parti in movimento ed all'attrezzatura elettrica.

HydroVenturi. HydroVenturi era originariamente una società scorporata dell'Imperial College di Londra, che ora ha uffici a Londra e San Francisco. Un prototipo di questo sistema di 0.6 m di diametro da 25 kW è stato provato a Grimsby in Gran Bretagna nel 2002 (Figura 23). E' previsto un dispositivo da 1 MW da installare nella baia di S. Francisco.



Figura 23. HydroVenturi (<http://www.hydroventuri.com/>).

2.7 Dispositivi magnetofluidodinamici

La conversione diretta di energia idrodinamica in elettrica può essere con dispositivi MHD, senza parti meccaniche in movimento, in grado di funzionare con le velocità impresse alle particelle fluide sia dalle correnti che dalle onde. Tali dispositivi (Figura 24) sono costituiti da un circuito elettrico che opera come lo statore di una dinamo, mentre il rotore è costituito dalla stessa acqua marina. Lo studio di tali dispositivi è al momento puramente teorico e condotto nell'ambito del progetto EMEC Neptune in Olanda.



Figura 24. Neptune Systems.

3. CONCLUSIONI

I dispositivi di conversione dell'energia dovuta alle correnti marine in energia elettrica qui esaminati sono per lo più prototipi per i quali non si ha una sufficiente documentazione tecnica ed un congruo periodo di sperimentazione trattandosi di macchine installate in tempi recenti. Di nessuno di questi dispositivi, pur dovendo operare in ambiente decisamente ostile, se ne conosce ad esempio il grado di affidabilità. La tecnologia più matura è senza dubbio quella delle turbine ad asse orizzontale, tecnologia derivante da quella dei generatori eolici e che si avvale delle estese conoscenze circa i propulsori navali, che operano già da tempo nello stesso ambiente marino.

Attualmente gli unici dispositivi in fase quasi commerciale sono quelli britannici della Marine Current Turbines. Si tratta però di macchine di grande potenza di dimensioni troppo grandi per i bassi fondali frequenti nelle nostre coste, ed ottimizzate per correnti di intensità superiore a quelle che si presentano spesso nel Mediterraneo. Pertanto anche le turbine ad asse orizzontale andrebbero ripensate e riportate ad una scala mediterranea e ciò potrebbe costituire un ottimo investimento per l'industria nazionale, un domani esportabile in anche in altre realtà.

Le turbine ad asse orizzontale sono poi le più indicate in quei casi in cui per non ostacolare la navigazione si debba operare con dispositivi completamente sommersi.

Più promettente per il Mediterraneo, anche se con minore storia alle spalle, sembrerebbe essere l'impiego delle turbine ad asse verticale per i motivi già illustrati di omnidirezionalità, di maggiori rendimenti con correnti di bassa entità, di maggiore semplicità di montaggio e manutenzione, e di minore usura potendo risultare emerse sia la parte elettrica che gran parte di quella meccanica. Sotto tale profilo il più avanzato, e di cui si dispone di ampia documentazione, è il progetto Kobold della società italiana Ponte di Archimede di cui si è riferito al punto 4.3. Di tale dispositivo si è già avuta una sufficiente sperimentazione su un prototipo nello Stretto di Messina ed altri dispositivi stanno per essere montati in Estremo Oriente.

BIBLIOGRAFIA

Betz, A., 1966. Introduction to the Theory of Flow Machines. D.G. Randall, Trans., Oxford. Pergamon Press.

Bryden, I.G. and Couch, S.J., 2006. *Renewable Energy* 31, 133–139.

Bryden, I.G., Grinsted, T. and Melville, G.T., 2004. *Applied Ocean Research* 26,198–204.

Clarke, J.A. et al., 2006. Regulating the output characteristics of tidal current power stations to facilitate better base load matching over the lunar cycle. *Renew Energy* 31, 173–80.

Coiro, D.P., De Marco, A., Nicolosi, F., Melone, S. and Montella, F., 2005. Dynamic Behaviour of the Patented Kobold Tidal Current Turbine: Numerical and Experimental Aspects. Czech Technical University in Prague *Acta Polytechnica* 45, No. 3.

Coiro, D.P., Melone S. and Montella F. Energia pulita dalle correnti marine: aspetti tecnici ed economici. www.tecnosophia.org/documenti/Articoli/SessioneII/Coiro%20II.pdf

Fraenkel, P.L., 2007. Marine current turbines: pioneering the development of marine kinetic energy converters. *Proc. IMechE Vol. 221, Part A. Journal of Power and Energy* 159-169.

Gorban, A.N., Gorlov, A.M. and Silantyev, V.M., 2001. Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow. *Journal of Energy Resources Technology* 123, 311-317.

International Energy Agency. *World Energy Outlook 2007*; 2007.

Rourke, F.O., Boyle, F.L. and Reynolds, A., 2010. Tidal energy update 2009. *Applied Energy* 87, 398–409.

Rourke, F.O., Boyle, F.L. and Reynolds, A., 2009. Renewable energy resources and technologies applicable to Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Review* 13, 1975-1984.

RIFERIMENTI INTERNET

Tidal Energy Ltd. DeltaStream Concept; 2008. www.tidalenergyltd.com/technology.htm.

Ocean Flow Energy Ltd. 2008. <http://www.oceanflowenergy.com/development-status.htm>.

Marine Current Turbines Ltd.; 2008. <http://www.marineturbines.com>.

Verdant Power Ltd. Verdant Power's Free Flow Turbines; 2008. <http://www.verdantpower.com>.

Open-Hydro Ltd <http://www.openhydro.com/technology.html>.

Lunar Energy Ltd.; 2008. <http://www.lunarenergy.co.uk/News.php>.

Aquamarine Power Ltd. Aquamarine Power; 2009. <http://www.aquamarinepower.com>.

Atlantis_Resources_Corporation Ltd.; 2009. <http://peswiki.com/index.php>.

European Marine Energy Center. <http://www.emec.eu>.

OpenHydro Ltd. OpenHydro; 2008. <http://www.openhydro.com>.

Hydro Tidal Energy. <http://www.hydratidal.com/>

Pulse Generation Ltd. <http://www.oceanenergycouncil.com/>

SMD Hydrovision Ltd. Tidal Stream Generator; 2008. <http://smd.co.uk/products/>.

Hammerfest Strøm Ltd. <http://www.hammerfeststrom.com/>

Underwater Electric Kite Company <http://uekus.com/>

Blue Energy http://peswiki.com/index.php/Directory:Blue_Energy

TidEl Stream Generator <http://www.reuk.co.uk/print.php?article=TidEl-Tidal-Turbines.htm>

IHC Engineering Business Ltd. Stingray Tidal Stream Generator; 2008. http://www.engb.com/services_09a.php.