

Moto ondoso e maree

Corso: Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili
Anno accademico: 2018/2019
Docente: Mirko Morini

Le caratteristiche del moto ondoso

L'energia delle onde marine deriva dal movimento dell'acqua in prossimità della superficie libera del mare che può essere di tipo oscillatorio o circolare.

Le onde si formano per il passaggio del vento sulla superficie degli oceani. Queste onde possono viaggiare per migliaia di chilometri senza dissipare troppa energia.

In prossimità della costa le onde subiscono una riduzione di energia a causa dell'interazione con il fondale. Tale riduzione può essere compensata da effetti di concentrazione ed amplificazione generate da rifrazione e riflessione delle onde stesse a causa dell'interazione con la costa.

Le caratteristiche del moto ondoso

Un'onda la cui cresta si muove perpendicolarmente alla sua linea è detta progressiva.

Un'onda nella quale la cresta non si sposta longitudinalmente, ma ad una fissata coordinata x l'onda modifica la propria quota rispetto alla Still Water Line è detta stazionaria.

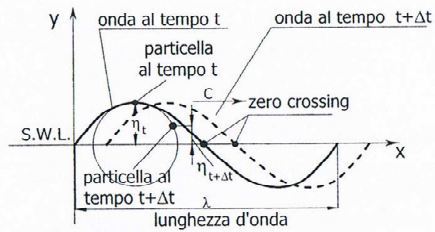


Figura 7.2 Caratteristica delle onde progressive

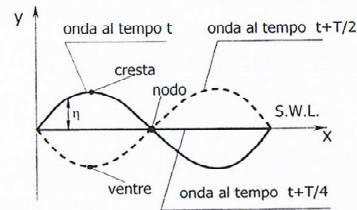
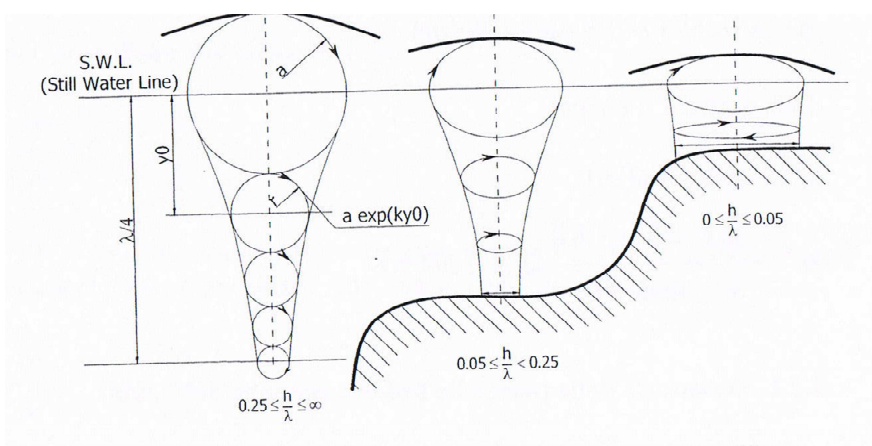
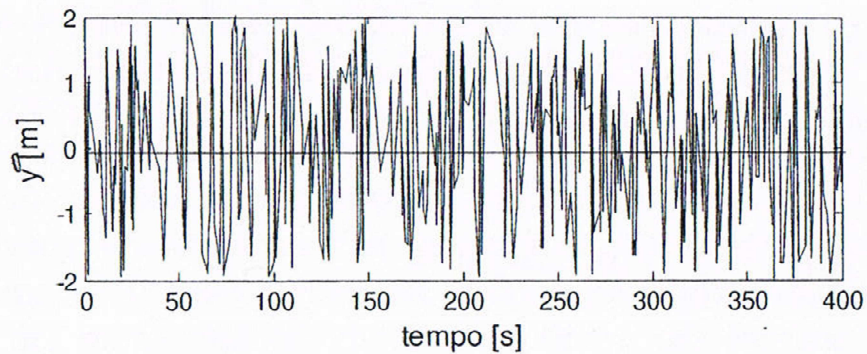


Figura 7.3 Caratteristica delle onde stazionarie

Il moto delle particelle



Caratteristiche reali delle onde



Si devono definire dei parametri equivalenti per descrivere questo moto stocastico (per esempio l'altezza significativa e il periodo zero crossing)

L'energia delle onde

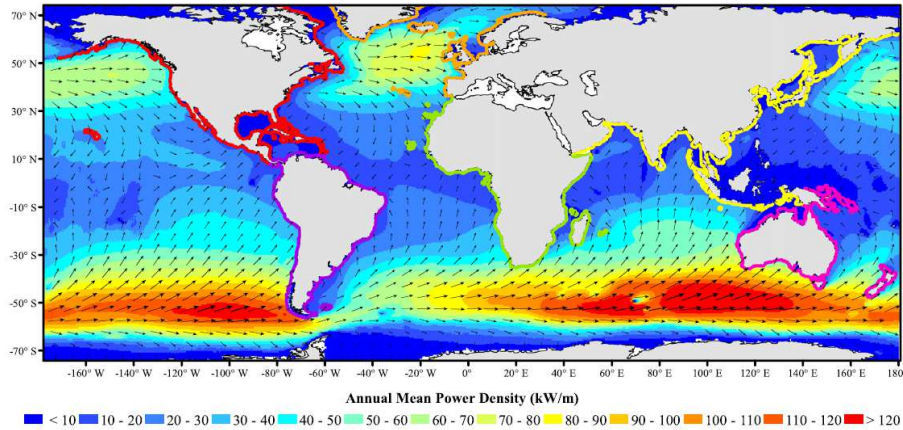
In genere il livello di energia delle onde è espresso come potenza per unità di lunghezza (nella direzione della cresta dell'onda o nella direzione della costa a seconda che si parli di applicazioni in mare aperto o costali).

Valori tipici (come media annua) per buone località in mare aperto variano tra 20 kW/m e 70 kW/m e in genere si trovano a latitudini medio/alte.

La variazione stagionale è maggiore nell'emisfero nord piuttosto che in quello sud, per questo le coste del Sud America, Africa e Australia sono particolarmente attraenti per lo sfruttamento dell'energia delle onde per la generazione elettrica.

Diversi studi sono stati presentati per il censimento dell'energia disponibile. Uno strumento molto importante in Europa è il WERATLAS, nel quale sono censiti 85 punti sull'Atlantico e nel Mediterraneo. Attraverso modelli di interazione vento-onde validati da misurazioni sperimentali il WERATLAS dà indicazioni fondamentali per la progettazione di sistemi per lo sfruttamento delle onde in Europa.

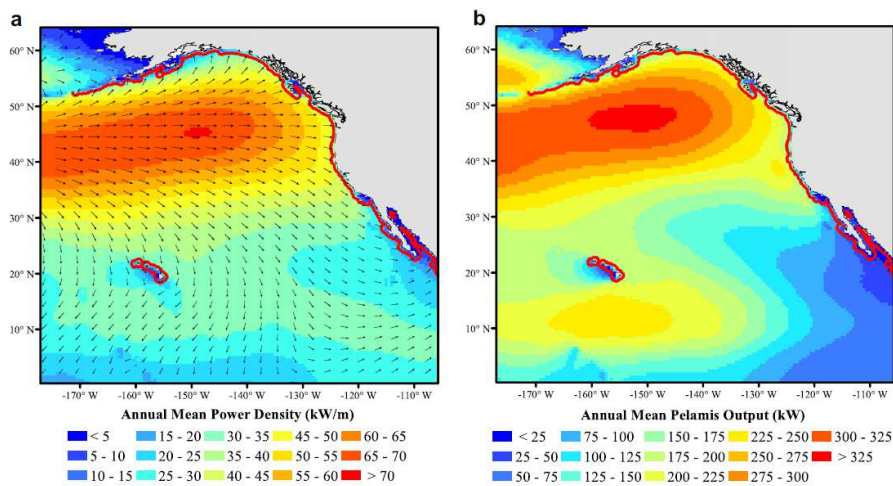
L'energia delle onde



Stima della densità di potenza media annua

Gunn K, Stock-Williams C, Quantifying the global wave power resource, Renewable Energy (2012), doi:10.1016/j.renene.2012.01.101

La produzione di energia



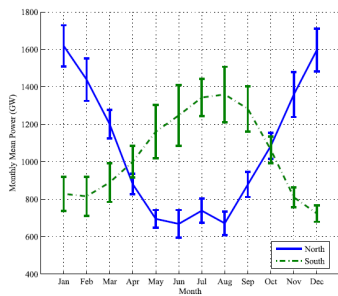
A seconda del dispositivo utilizzato per la conversione dalla densità di potenza si può stimare la potenza erogata e l'energia prodotta.

Gunn K, Stock-Williams C, Quantifying the global wave power resource, Renewable Energy (2012), doi:10.1016/j.renene.2012.01.101

La stima di produzione

Si stima che la potenza media delle onde incidenti sulle coste oceaniche sia pari a
 2.11 TW
 La potenza producibile è stata valutata in
 96.6 GW

La potenza incidente non è costante durante l'anno



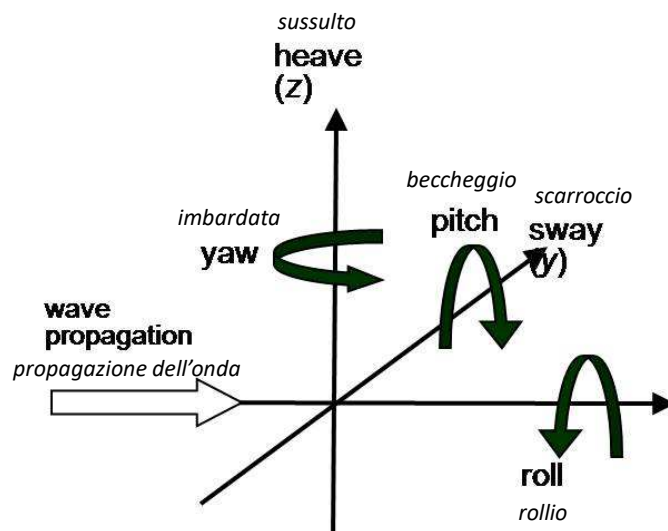
Resource and yield estimates for selected countries ($\pm 95\%$ confidence intervals).

Country	P (GW)	Ψ (GW)	η_{Ψ} (%)
Australia	280 ± 13	8.3 ± 0.2	3.0
United States	223 ± 12	3.59 ± 0.17	1.6
Chile	194 ± 11	4.62 ± 0.17	2.4
New Zealand	89 ± 16	3.51 ± 0.16	4.0
Canada	83 ± 7	5.13 ± 0.19	6.2
South Africa	69 ± 4	2.17 ± 0.08	3.1
United Kingdom	43 ± 4	2.44 ± 0.14	5.7
Ireland	29 ± 4	1.13 ± 0.09	3.8
Norway	29 ± 4	1.67 ± 0.12	5.7
Spain	20 ± 3	0.65 ± 0.05	3.3
Portugal	15 ± 2	0.49 ± 0.04	3.2
France	14 ± 3	0.57 ± 0.06	3.9

L'Australia potrebbe coprire il 30 % del suo attuale consumo di energia elettrica (243.96 TWh) con energia elettrica da moto ondoso.

Gunn K, Stock-Williams C, Quantifying the global wave power resource, Renewable Energy (2012), doi:10.1016/j.renene.2012.01.101

Modi di oscillare



Il captatore puntuale

Non esiste alcuna proporzionalità fra l'energia captabile e le dimensioni del captatore del moto ondoso.

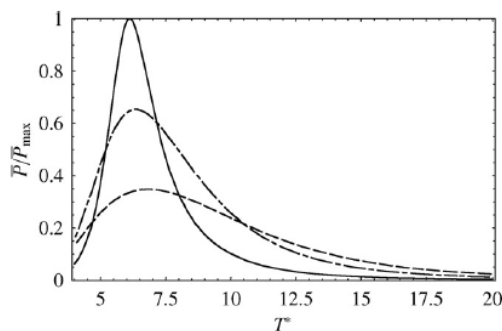
Piccoli dispositivi possono infatti presentare il vantaggio del cosiddetto effetto del captatore puntuale: un piccolo corpo oscillante di forma circolare ed il cui diametro risulta trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda λ può assorbire una frazione pari a $\lambda/2\pi$ (sussulto) dell'energia contenuta nell'onda.

Questo valore è un limite teorico superiore (analogo del limite di Betz per i dispositivi per lo sfruttamento del vento), ma il principio è comunque valido e piccoli convertitori possono generare una considerevole quantità di energia.

I piccoli convertitori presentano però frequenze naturali abbastanza diverse da quelle utili dello spettro di potenza del moto ondoso per cui risulta difficile estendere e rendere ottimale la loro applicazione.

Al crescere delle dimensioni del dispositivo gli effetti positivi vanno progressivamente attenuandosi.

Il captatore puntuale



Prestazioni di dispositivi puntuali diversamente smorzati rispetto al periodo dell'onda.

Un sistema risponde efficientemente per una banda ristretta di periodo. Il sovrasmorzamento (linee tratteggiate) produce un ampliamento della banda, ma una riduzione del massimo, si alza però il rendimento nel campo di interesse delle onde reali.

Considerando un periodo di 10 s il raggio ottimale di una boa emisferica risulterebbe di 26 m, troppo elevato per applicazioni pratiche ed economiche.

Per questo motivo più che sulla strada del captatore puntuale si sono battute altre strade.

La risonanza

Gli studi teorici sui convertitori a corpi oscillanti o OWC hanno mostrato che per ottenere dispositivi efficienti la frequenza propria dei convertitori deve essere uguale alla frequenza delle onde, il convertitore deve operare quindi in condizioni di risonanza o vicino a queste condizioni.

In pratica però la coincidenza tra le frequenze è molto difficile:

- in genere a meno che il corpo non sia molto grande la sua frequenza propria è molto più alta rispetto a quella delle onde;
- le onde reali non hanno una singola frequenza, ma sono la composizione di più onde.

Per questo motivo si sono sviluppati dei sistemi di controllo che agiscono sulla macchina di conversione per ottenere la coincidenza tra le frequenze. Questa metodologia è detta controllo di fase.

I dispositivi per moto ondoso

Il primo dispositivo per lo sfruttamento dell'energia da moto ondoso fu brevettato in Francia nel 1799 da Girard padre e figlio. L'energia delle onde era convertita in energia meccanica per trascinare pompe, seghe, mulini etc.

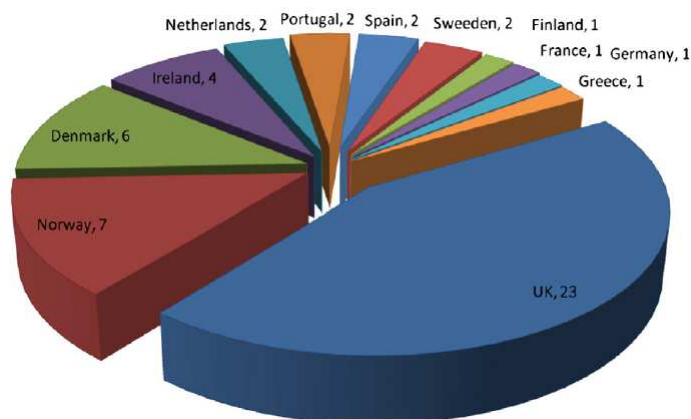
I dispositivi moderni possono essere considerati tutti figli della boa inventata negli anni '40 da Yoshio Masuda. La boa era alimentata da una turbina ad aria secondo il principio della colonna d'acqua oscillante (oscillating water column, OWC).

La crisi petrolifera degli anni '70 ha rinverdito l'interesse nello sfruttamento di questa energia su larga scala. In quegli anni Gran Bretagna e Norvegia hanno fatto partire imponenti programmi di ricerca.

Un'altra spinta alla ricerca in questo campo è stata data dall'Unione Europea che dal 1991 ha inserito tra gli obiettivi dei propri programmi comunitari lo sfruttamento dell'energia delle onde.

Negli ultimi anni anche Stati Uniti e Canada hanno individuato in questa fonte una possibile alternativa per il futuro.

Lo sviluppo di dispositivi



La ricerca e lo sviluppo in questo campo è quindi ancora in divenire. Solo in Unione Europea si stimano 49 tecnologie sviluppate negli ultimi anni.

Environmental Impact Assessment Review 32 (2012) 33-44

Lo sviluppo di dispositivi

L'assorbimento dell'energia delle onde è un processo idrodinamico molto complesso dal punto di vista teorico, poiché bisogna tenere conto di problemi di diffrazione e radiazione delle onde.

Dal punto di vista pratico poi ci sono problematiche relative alla progettazione delle macchine di conversione dell'energia (turbine ad aria, motori idraulici, generatori elettrici, etc.) connesse alla variabilità su diverse scale dell'energia trasportata dalle onde: c'è una scala legata al periodo delle onde (qualche secondo), lo stato del mare (ore o giorni) e quella stagionale.

Bisogna poi tenere conto che tutti questi dispositivi sono sottoposti a condizioni estreme.

Molte tipologie di dispositivi sono stati proposti e possono essere classificati in base alla loro localizzazione, al principio di funzionamento e alla dimensione.

Classificazione dei dispositivi

- Assorbitori Puntuali (point absorbers): questi dispositivi presentano una dimensione caratteristica normalmente molto piccola rispetto alla lunghezza d'onda. Sfruttano la risalita/l'abbassamento dell'altezza d'onda in un singolo punto e la possibilità di raccogliere energia da una porzione di fronte d'onda maggiore del loro diametro. Non ricevono quindi energia da una direzione d'onda principale e sono in grado di catturare energia dalle onde in arrivo da ogni direzione.
- Attenuatori (attenuators): questi dispositivi sono strutture galleggianti, orientate parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda. Generalmente, sono composti da più segmenti tra loro incernierati, per una lunghezza complessiva pari o maggiore della lunghezza d'onda. Le diverse altezze d'onda lungo lo sviluppo del dispositivo producono la flessione delle parti tra loro connesse andando ad attivare delle pompe che generalmente vengono alloggiare tra ogni coppia di segmenti. Le pompe riforniscono degli accumulatori, e da qui, il fluido pressurizzato aziona dei generatori.
- Terminatori (terminators): questi dispositivi sono collocati parallelamente al fronte d'onda. Sono chiamati terminatori perché sono in grado di fornire un significativo ostacolo alla propagazione delle onde, andando a catturare e riflettere l'energia ondata. Tipicamente sono collocati a riva o sotto-costa, ma sono stati progettati dispositivi di tipo galleggiante anche per l'installazione off-shore.

Classificazione dei dispositivi

Classificazione in base alle dimensioni:

- captatori puntuali
- captatori di grandi dimensioni

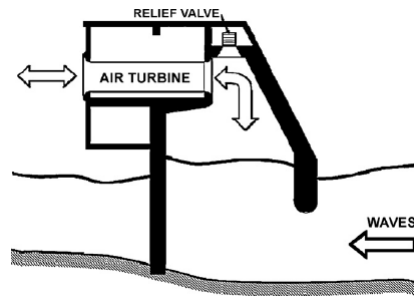
Classificazione in base alla localizzazione:

- sulla linea di costa
- in prossimità della linea di costa
- in mare aperto

Classificazione in base al principio di funzionamento:

- captatori a colonna d'acqua oscillante (OWC)
 - a struttura fissa
 - galleggianti
- captatori a corpi oscillanti
 - a corpo singolo
 - a due corpi
 - a più corpi
 - a beccheggio
 - sommersi
 - incernierati
- captatori overtopping

Captatori OWC a struttura fissa



I captatori OWC a struttura fissa in genere sono appoggiati sul fondo del mare o fissati alle scogliere. I dispositivi sulla linea di costa hanno il vantaggio di una installazione e manutenzione semplice e non richiedono ormeggi e lunghi cavi elettrici di trasmissione.

La scarsa energia delle onde sulla costa può essere mitigata dagli effetti di rifrazione e diffrazione.

Questi sistemi sono formati da una struttura in cemento armato o acciaio parzialmente sommersa aperta sotto la superficie dell'acqua. L'aria rimane intrappolata nel volume raccolto tra la superficie dell'acqua e la struttura.

Il moto oscillatorio della superficie interna dell'acqua prodotto dalle onde incidenti fa sì che l'aria fluisca con moto alternato attraverso una turbina che trascina un generatore elettrico.

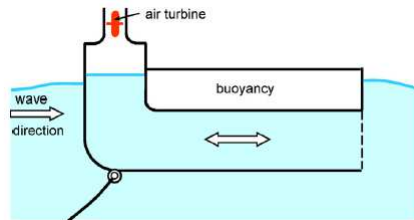
Captatori OWC a struttura fissa

Dall'inizio degli anni '80 si è evidenziato anche sperimentalmente come il processo di captazione possa essere migliorato estendendo le strutture della camera con delle protrusioni (naturali o artificiali) nella direzione delle onde, formando una sorta di golfo o collettore.

Il progetto e la costruzione delle strutture è l'aspetto più critico della tecnologia OWC a struttura fissa e ha l'influenza preminente sull'economicità della produzione di energia con questa tecnologia.

Ad oggi le opere civili sono di gran lunga il maggior costo di questi sistemi. L'integrazione di questi sistemi in un frangiflutti ha quindi diversi vantaggi: i costi sono condivisi, l'accesso all'impianto per la costruzione, la gestione e la manutenzione è più facile.

Captatori OWC galleggianti



I primi convertitori OWC sviluppati da Masuda appartenevano a questa tecnologia: la boa alimentata dalle onde e la chiatta Kaimei.

Il Backward Bent Duct Buoy (a fianco) si differenzia perché l'apertura del condotto è posta dalla parte opposta rispetto all'onda incidente.

In questo modo la lunghezza della colonna d'acqua può essere sufficientemente grande per raggiungere la risonanza, mantenendo però il pescaggio entro limiti accettabili.

Un'altra tecnologia è quella del Mighty Whale che consiste in una struttura galleggiante (50 m x 30 m per un pescaggio di 12 m e una stazza di 4400 t) che ha tre camere per l'aria sulla parte frontale e ai lati connesse a tre turbine Wells.

La Spar Buoy è di concezione molto semplice. E' un galleggiante assialsimmetrico innestato su di un condotto verticale aperto da entrambi i lati. Il moto relativo fuori fase tra la superficie dell'acqua all'interno del tubo e il galleggiante guida una turbina ad aria.

Analoga è la Sloped Buoy che ha i condotti inclinati in modo da oscillare con un angolo intermedio tra la direzione ortogonale alla superficie del pelo libero dell'acqua e la direzione di propagazione dell'onda.

Captatori a corpi oscillanti

I dispositivi off-shore sono generalmente a corpi oscillanti, sia galleggianti sia sommersi. Questi consentono di sfruttare la maggiore energia disponibile nelle onde nelle acque profonde (tipicamente profondità superiori ai 40 m).

Questi dispositivi sono più complessi rispetto a quelli visti precedentemente. A questa maggiore complessità va anche sommata la problematica dell'ormeggio, dell'accesso per manutenzione e della necessità di lunghe connessioni elettriche subacquee per la trasmissione dell'energia.

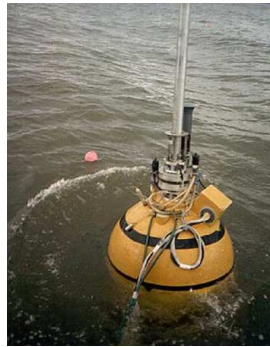
Tutto ciò ha frenato lo sviluppo, e solo recentemente alcuni sistemi hanno raggiunto lo stadio del dimostrativo.

Captatori a corpi oscillanti

Captatori a corpo singolo

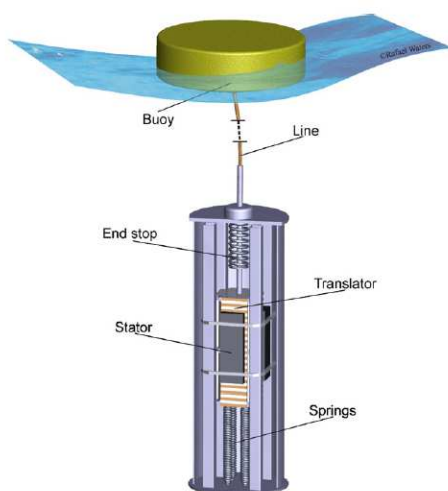
In questi sistemi una boa oscilla per moto sussultorio rispetto ad un sistema di riferimento fisso. Nella maggior parte dei casi questi sono assorbitori puntuali.

Uno dei primi prototipi (Tokyo, 1980) fu il G-1T che consisteva in una boa cuneiforme a base rettangolare il cui moto verticale era guidato da una struttura in metallo fissata ad un frangiflutti. La macchina per la conversione era un pistone idraulico.



Un altro sistema è la Norwegian Buoy (a lato) consistente in un galleggiante di forma sferica che può oscillare rispetto ad una struttura metallica ancorata. La boa può essere controllata in fase e come macchina per la conversione montava una turbina ad aria.

Captatori a corpi oscillanti

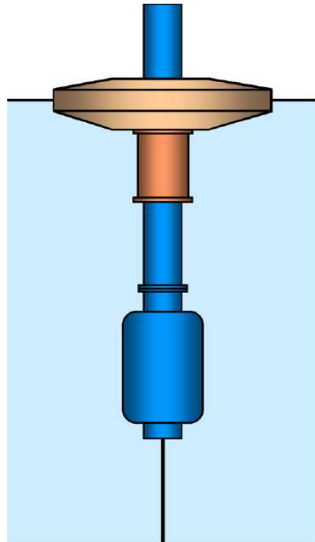


Una concezione alternativa è quella della boa collegata con un cavo tenuto in tensione da una molla ad una struttura fissata al fondo del mare .

Il moto relativo tra il galleggiante e il fondo del mare alimenta la macchina per la conversione.

Quest'ultima può essere una pompa a pistoni che comprime l'acqua di alimentazione di una turbina idraulica o un generatore elettrico lineare (a fianco).

Captatori a corpi oscillanti



Un generatore elettrico lineare è stato usato anche in questo prototipo che consiste in una boa anulare che può traslare rispetto ad un'asta con pescaggio profondo.

L'asta è ormeggiata al fondo del mare.

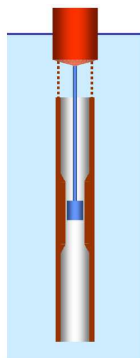
Il moto relativo alimenta un generatore lineare a magneti permanenti.

Captatori a corpi oscillanti

Captatori a due corpi

L'utilizzo di captatori a singolo corpo ha il limite nella distanza tra la superficie libera dell'acqua e il fondo del mare. Ciò è aggravato anche dal fatto che questa distanza non è costante ma risente delle maree.

Per questo si è pensato di sfruttare il moto relativo tra due corpi oscillanti in maniera differente.



Uno dei primi sistemi è il Bipartite Point Absorber che consiste in due galleggianti, quello esterno caratterizzato da una bassa frequenza di risonanza funziona da struttura di riferimento mentre quello interno agisce da captatore.

Uno dei sistemi più interessanti è la IPS Buoy (a lato) che consiste in una boa rigidamente connessa ad un tubo verticale completamente sommerso aperto da entrambe le estremità. Il tubo contiene un pistone il cui moto relativo rispetto al tubo (moto originato dall'azione delle onde sul galleggiante e dall'inerzia dell'acqua contenuta nel tubo) alimenta la macchina di conversione.

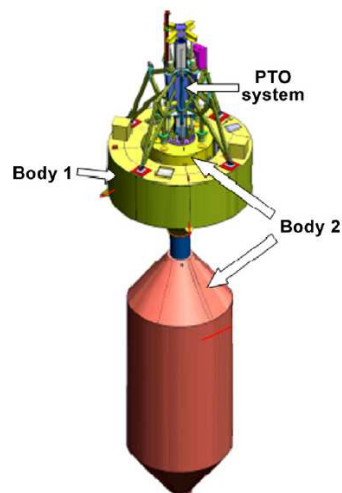
Captatori a corpi oscillanti



L'AquaBuOY (a lato) è un sistema concepito negli anni 2000 che combina il principio di funzionamento dell'IPS Buoy con una coppia di pompe peristaltiche per produrre un flusso di acqua ad alta pressione che alimenta una Pelton.

Una variante dell'IPS Buoy è la versione inclinata che può oscillare con un angolo sul piano tra la verticale del pelo libero dell'acqua e la direzione di propagazione dell'onda.

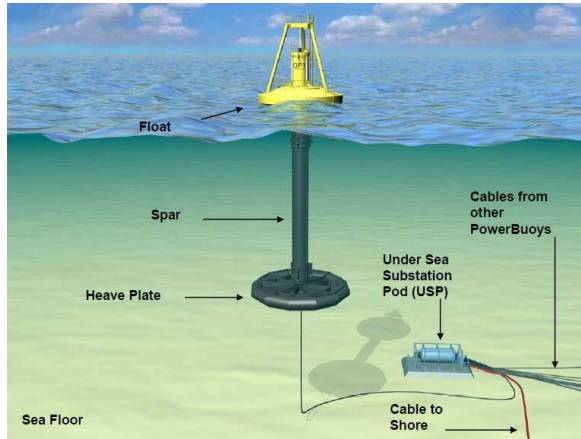
Captatori a corpi oscillanti



Il Wavebob (a lato) consiste in due boe assialsimmetriche coassiali il cui moto relativo è convertito mediante un sistema oleodinamico ad alta pressione.

La boa interna è rigidamente connessa ad un corpo completamente sommerso il cui scopo è aumentarne l'inerzia con la possibilità di regolare mediante la massa di questo corpo la risposta del sistema con la frequenza delle onde.

Captatori a corpi oscillanti



Il Powerbuoy è composto da un galleggiante a forma di disco che si muove relativamente ad un'asta che termina con una zavorra piatta (la funzione della zavorra è aumentare l'inerzia anche con la colonna d'acqua che la sovrasta).

Il moto relativo è convertito in elettricità mediante una macchina idraulica.

Captatori a corpi oscillanti

Captatori a più corpi

Diversi assorbitori galleggianti reagiscono rispetto ad un comune sistema di riferimento. E' il caso del progetto norvegese FO3 (sotto), un sistema per applicazioni in prossimità della costa o in mare aperto consistente in 21 boe ovoidali che oscillano rispetto ad una grande struttura galleggiante caratterizzata da una frequenza di risonanza molto bassa. La struttura sorregge un sistema idraulico per la generazione elettrica.



Un altro sistema è il Wave Star, presentato in Danimarca: due file di galleggianti racchiuse in una struttura metallica orientata nella direzione dominante di propagazione delle onde. La macchina per la generazione elettrica è un motore idraulico alimentato da un circuito di olio ad alta pressione.

Un sistema simile con turbina Pelton è stato presentato in Brasile.

Captatori a corpi oscillanti

Captatori a beccheggio

Sono sistemi basati su un moto relativo di rotazione alternata piuttosto che traslazione. Il sistema più famoso è il cosiddetto "nodding Duck" inventato negli anni '70. E' un galleggiante a forma di camma che oscilla secondo la direzione di beccheggio. Il sistema fisso rispetto al quale il galleggiante ruota è fornito da un giroscopio.

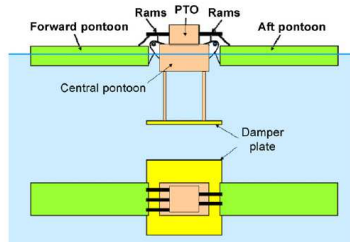


Captatori a corpi oscillanti

Un'altra tipologia utilizza una serie di zattere incernierate tra loro che seguono il profilo dell'onda. In ogni cerniera è sistemato un sistema idraulico di conversione.



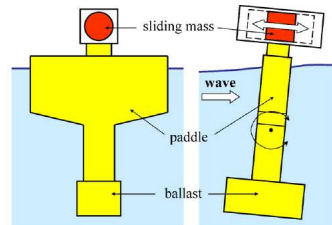
Questo principio è sfruttato nel [Pelamis](#), composto da quattro sezioni cilindriche concatenate nella direzione di propagazione dell'onda. Nei giunti pistoni idraulici pompano olio per alimentare i motori idraulici e i generatori. L'accumulo di energia è fornito da gas in pressione.



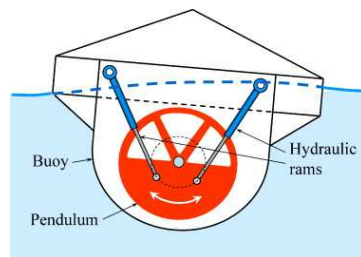
Un altro sistema è la McCabe Wave Pump. Due zattere rettangolari di metallo sono collegate ad un galleggiante centrale il cui moto sussultorio alimenta i pistoni idraulici.

Captatori a corpi oscillanti

In altri sistemi a due corpi solo uno è in contatto con l'acqua, l'altro è sollevato o completamente contenuto nel primo.



Il PS Frog Mk 5 è un sistema composto da una grande boa con una pala (paddle) e una zavorra (ballast). La pala è spinta dall'onda mentre la zavorra oppone resistenza, la conversione è data dalla massa che scorre sulle guide in testa alla boa.

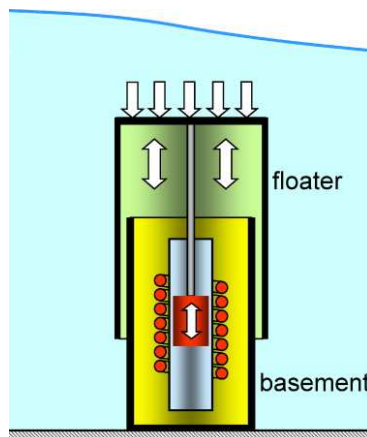


Il Searev è un dispositivo galleggiante nel quale una massa rotante agisce come pendolo alimentando dei pistoni idraulici.

Captatori a corpi oscillanti

Captatori sommersi

L'Archimede Wave Swing (AWS) è un sistema basato sul movimento sussultorio completamente sommerso sviluppato in Olanda. Consiste in una parte superiore oscillante e in un basamento fisso.



Il galleggiante è spinto verso il basso dal peso della massa d'acqua che lo sovrasta quando passa la cresta dell'onda.

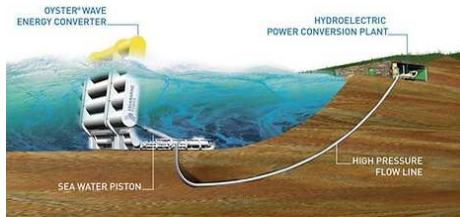
Quando è sovrastato dalla gola dell'onda il galleggiante si muove verso l'alto.

Il moto alimenta un generatore elettrico lineare, mentre l'aria contenuta agisce come molla respingendo verso l'alto il galleggiante.

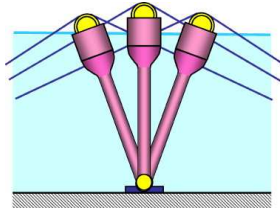
Captatori a corpi oscillanti

Captatori incernierati

Dei sistemi a singolo corpo oscillante in beccheggio sono stati proposti. Questi sistemi sono basati su pendoli invertiti incernierati al fondo del mare.



Il sistema Oyster è un sistema composto da un ostacolo verticale interposto alla propagazione dell'onda. Il movimento viene utilizzato per pompare dell'acqua che alimenta una turbina Pelton.

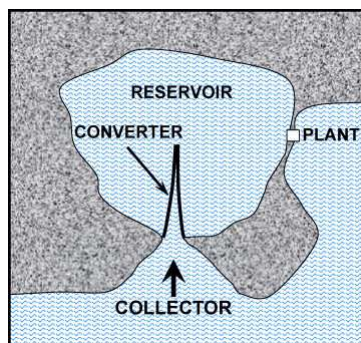


Il MACE è un'asta galleggiante che oscilla rispetto ad una cerniera sul fondo del mare.

Il moto oscillatorio fa ruotare un argano su di un cavo. Il moto rotatorio alternato è trasformato in energia attraverso un convertitore idraulico.

Captatori Overtopping

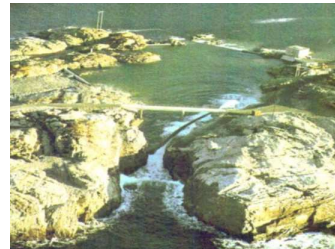
E' un modo di convertire l'energia delle onde che sfrutta un principio completamente diverso rispetto a quelli visti finora. In questa tipologia di impianti si cattura l'acqua che è nei pressi della cresta dell'onda (e che quindi ha elevata energia potenziale) e la si stocca in un serbatoio in quota rispetto al livello dell'acqua. L'energia potenziale stoccata è utilizzata per trascinare delle turbine idrauliche a basso salto.



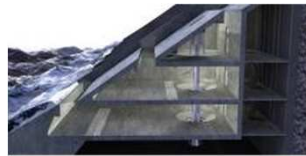
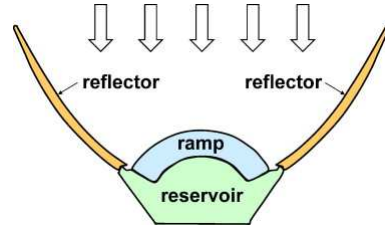
Il sistema Tapchan sviluppato negli anni '80 in Norvegia è un esempio.

Un collettore concentra le onde amplificandone l'ampiezza. Le creste delle onde vengono raccolte nel serbatoio.

L'impianto di conversione consiste in una tradizionale turbina Kaplan.



Captatori Overtopping



In altri sistemi come il Wave Dragon le onde incidenti devono superare una rampa per essere poi stoccate in un serbatoio.

Il Wave Dragon è una struttura galleggiante nella quale i riflettori concentrano le onde verso una rampa a doppia curvatura, un serbatoio e una serie di turbine idrauliche per salti bassi.

Il Seawave Slot-Cone Generator si basa sul principio dell'overtopping. Attraverso fenditure a diverse quote vengono riempiti dei serbatoi che alimentano turbine idrauliche coassiali.

I dispositivi di conversione

Tutti i sistemi presentati alla fine devono produrre energia elettrica da fornire alla rete. Per questo utilizzano dispositivi per la conversione dell'energia meccanica. I più frequenti sono le turbine ad aria, le turbine idrauliche e i motori idraulici.

Le turbine ad aria sono i primi sistemi utilizzati. Le turbine convenzionali non possono essere utilizzate perché il moto dell'aria è alternato, nuove turbine sono state sviluppate.

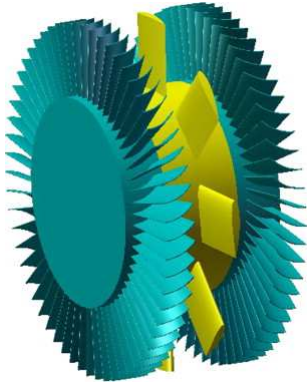
Nei dispositivi overtopping sono utilizzate turbine idrauliche per bassi salti, mentre turbine per alti salti sono usati nei sistemi a corpi oscillanti che comprimono l'acqua.

I circuiti oleodinamici ad alta pressione con pistoni, accumulatori a gas e motori idraulici sono utilizzati in molti sistemi a corpi oscillanti, incluso il Pelamis.

Anche generatori elettrici lineari sono stati presi in considerazione.

Lo stoccaggio dell'energia che è un modo per mediare sulle variazioni del moto ondoso può essere fatto con l'effetto volano nelle turbine ad aria, l'accumulo d'acqua e gli accumuli di gas.

Le turbine autorettificanti



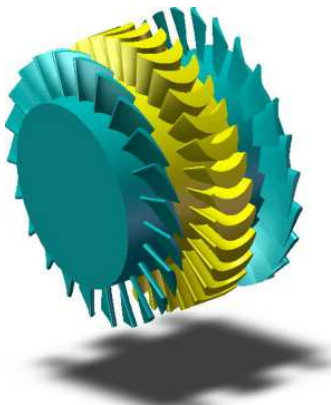
Il flusso di aria in queste applicazioni è alternato, random e con alta variabilità rispetto a scale temporali molto diverse (da pochi secondo a diversi mesi).

La turbina Wells è stata inventata negli anni '70. E' una turbina assiale autorettificante (la coppia non è dipendente dal verso del moto dell'aria) della quale esistono diverse versioni: a singolo rotore con e senza statore, doppio rotore in serie, doppio rotore controrotante.

I vantaggi sono: (i) alte velocità di rotazione per basse portate, (ii) buona efficienza di picco (0.7-0.8), (iii) è relativamente economica.

I punti deboli: (i) bassa (o addirittura negativa) coppia a basse portate, (ii) alte perdite per portate alte, (iii) rumore, (iv) diametro elevato in confronto alla potenza.

Le turbine autorettificanti



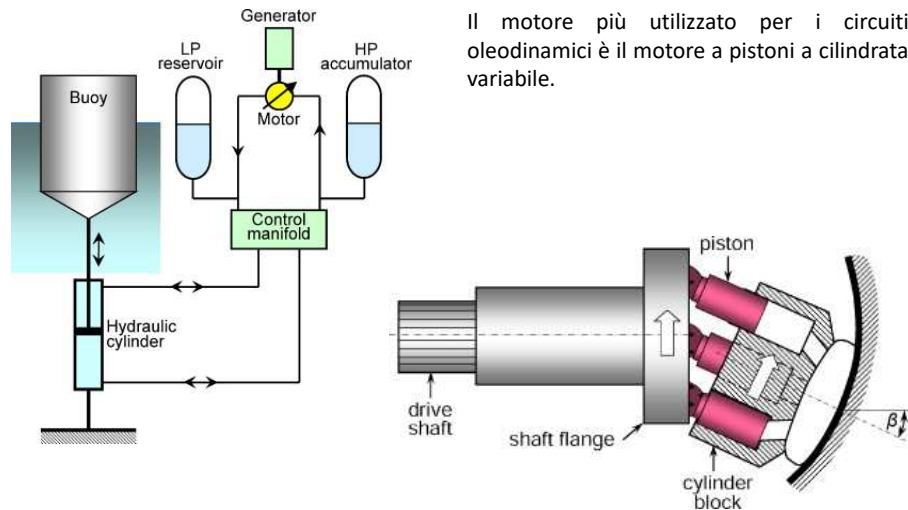
Un'alternativa alla Wells è la self-rectifying impulse turbine di Babinsten.

Il rotore è simile ad uno stadio di turbina a vapore, gli statori sono due invece che uno solo piazzati specularmente ai due lati.

La problematica principale è lo stallo dello statore a valle del rotore.

Un'altra turbina autorettificante è la turbina Denniss-Auld che è molto simile a una Wells ad angolo variabile.

Circuiti oleodinamici



Il motore più utilizzato per i circuiti oleodinamici è il motore a pistoni a cilindrata variabile.

L'energia dalle maree

L'energia dalle maree ha il potenziale per giocare un ruolo di rilievo in un futuro di energia sostenibile.

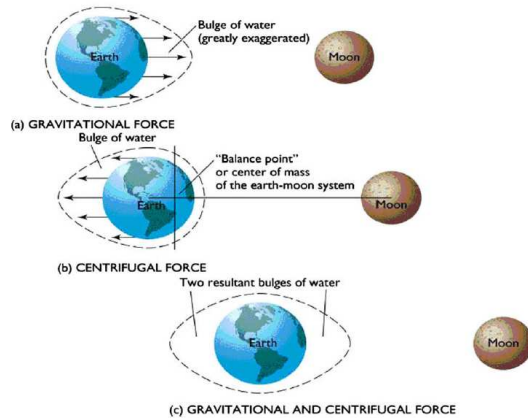
E' una fonte energetica estremamente prevedibile, dipendendo solamente dall'interazione gravitazionale della Terra con Luna e Sole e dalla forza centrifuga dovuta alla rotazione del sistema Terra-Luna.

Il primo esempio di sfruttamento delle maree per produzione di energia è la centrale di La Rance in Francia attiva dal 1967.

Lo sfruttamento dell'energia potenziale delle maree è una tecnologia consolidata che ha applicazioni commerciali, mentre la ricerca si sta concentrando sullo sfruttamento dell'energia cinetica associata allo spostamento dell'acqua.

Questa seconda tecnologia si può stimare che sia 15 anni indietro rispetto alla tecnologia per lo sfruttamento dell'energia eolica rispetto alla quale ha molte similitudini.

Il principio fisico



Il sole può rafforzare o indebolire l'effetto gravitazionale della Luna a seconda della sua posizione.

Le maree sono il regolare (in cicli di 24 h 50 min) innalzamento e abbassamento della superficie dei mari dovuto all'attrazione gravitazionale della Luna e del Sole e alla forza centrifuga dovuta alla rotazione del sistema Terra-Luna.

Un rigonfiamento è creato dall'interazione gravitazionale, mentre un altro dall'interazione dovuta alla rotazione reciproca. Quando la terra ferma si trova sulla congiungente Terra-Luna (2 volte al giorno) l'acqua tende ad ammassarsi e si ha alta marea, quando la terra ferma è a 90° (due volte al giorno) si ha bassa marea.

Il principio fisico

L'innalzarsi e l'abbassarsi del livello del mare provoca delle correnti di flusso (flow) e riflusso (ebb) nelle zone costiere e nelle zone in cui il flusso deve attraversare canali stretti.

La velocità della corrente in entrambe le direzioni varia da zero fino ad un massimo. La velocità nulla si riferisce al periodo di stagnazione che si frammezza tra un flusso e un riflusso e viceversa.

Si stima che la potenza dissipata a livello globale sulle coste sia pari a 2.5 TW.

Esistono quindi due classi di tecnologie per lo sfruttamento dell'energia delle maree

- i sistemi a sbarramento che sfruttano l'energia potenziale
- le turbine per le correnti di marea che sfruttano l'energia cinetica

Sistemi a sbarramento

I sistemi a sbarramento utilizzano l'energia potenziale delle maree. Lo sbarramento è tipicamente costituito da una diga costruita su di una baia o sull'estuario di un fiume sul quale si verificano escursioni di marea superiori a 5 m.

Il principio di conversione è lo stesso utilizzato per la generazione da fonte idroelettrica, con l'eccezione che il flusso dell'acqua potrebbe essere alternativamente in entrambe le direzioni.

Esistono due tipologie di impianti:

- a singolo bacino
 - generazione in riflusso
 - generazione in flusso
 - generazione bidirezionale
- a doppio bacino

Sistemi a singolo bacino

Una diga separa un bacino dal mare aperto. Si possono individuare tre modalità operative:

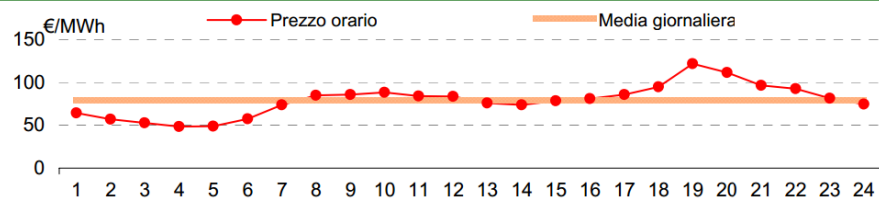
- generazione in riflusso: il bacino è riempito durante la fase di flusso attraverso apposite canalizzazioni che vengono chiuse al raggiungimento dell'alta marea (a canali chiusi ulteriore acqua può essere pompata attraverso la diga). In fase di riflusso, raggiunto un livello del mare sufficientemente basso da creare un salto adeguato sulla macchina idraulica l'acqua viene fatta fluire dal bacino interno all'esterno attraverso la turbina generando energia finché il livello interno non si è abbassato.
- generazione in flusso: le canalizzazioni e le turbine vengono tenute chiuse durante la fase di flusso finché all'esterno non si raggiunge un'altezza tale da garantire produzione di energia. Le turbine sono poi aperte e permettono all'acqua di fluire all'interno del bacino.
- generazione bidirezionale: le canalizzazioni e le turbine sono chiuse finché non ci si avvicina all'alta marea, vengono aperte le turbine e l'acqua fluisce all'interno generando energia. Quando il battente non è più sufficiente si aprono le canalizzazioni per riempire completamente il bacino interno. Si chiudono le canalizzazioni e in bassa marea si riaprono le turbine. Questa modalità permette uno sfruttamento del sistema di generazione per un tempo maggiore durante la giornata.

Sistemi a doppio bacino

Questi sistemi utilizzano due bacini, il bacino principale è lo stesso dei sistemi a generazione in riflusso a singolo bacino. La differenza sta nel fatto che una parte dell'energia elettrica prodotta durante la fase di riflusso è utilizzata per pompare acqua nel secondo bacino.

L'acqua nel secondo bacino è utilizzata per la generazione nelle ore di picco. E' quindi un sistema analogo agli impianti idroelettrici di pompaggio.

Prezzo di acquisto



Lo stato dell'arte



La Rance, Francia: è stato per molto tempo l'impianto più grande al mondo con una potenza di 240 MW. Attivo dal 1967 è situato sul fiume Rance in Bretagna. Lo sbarramento è lungo 720 m e racchiude un'area di 22 km². 24 turbine operano con un dislivello di 5 m in generazione bidirezionale e pompaggio.

L'impianto produce circa 600 GWh all'anno.



Annapolis, Canada: costruito tra il 1980 e il 1984 è un progetto pilota sulla baia che registra la più alta marea al mondo (16 m). Ha una potenza di 20 MW e produce 50 GWh all'anno.

Lo stato dell'arte



Jangxia Creek, China: i lavori sono iniziati nel 1980 ed ad oggi ha una potenza installata di 3.2 MW (3 turbine da 700 kW, una turbina da 600 kW e una da 500 kW). Genera circa 6500 MWh/anno.



Sihwa Lake, Corea: inaugurato nel 2011 è oggi il più grande impianto con la potenza di 254 MW. Sfrutta uno sbarramento costruito nel 1994 per la mitigazione delle maree e per scopi agricoli. Funziona solo con il flusso di marea.

Sempre in Corea del Sud è in costruzione la centrale di Incheon che con 1.32 GW di potenza ci si aspetta che dal 2017 possa produrre 2.5 TWh/anno.

Potenziati siti

Location	Mean range (m)	Basin area (km ²)	Potential mean power (MW)	Potential annual production (GW h/year)
<i>North America</i>				
Passamaquoddy	5.5	262	1800	15,800
Cobscook	5.5	106	722	6330
Bay of Fundy	6.4	83	765	6710
Minas-Cobequid	10.7	777	19,900	175,000
Amherst Point	10.7	10	256	2250
Shepody	9.8	117	520	22,100
Cumberland	10.1	73	1680	14,700
Petitcodiac	10.7	31	794	6960
Memramcook	10.7	23	590	5170
<i>South America</i>				
San Jose, Argentina	5.9	750	5870	51,500
<i>United Kingdom</i>				
Severn	9.8	70	1680	15,000
Mersey	6.5	7	130	1300
Solway Firth	5.5	60	1200	10,000
Thames	4.2	40	230	1400
<i>France</i>				
Aber-Benoit	5.2	2.9	18	158
Aber-Wrach	5	1.1	6	53
Arguenon	8.4	28	446	3910
Frenaye	7.4	12	148	1300
La Rance	8.4	22	349	3060
Rotheseuf	8	1.1	16	140
Mont St Michel	8.4	610	9700	85,100
Somme	6.5	49	466	4090
<i>Ireland</i>				
Strangford Lough	3.6	125	350	3070
<i>Russia</i>				
Kislaya	2.4	2	2	22
Lumbouskii Bay	4.2	70	277	2430
White Sea	5.65	2000	14,400	126,000
Mesen Estuary	6.6	140	370	12,000
<i>Australia</i>				
Kimberley	6.4	600	630	5600
<i>China</i>				
Baishakou	2.4	No data	No data	No data
Jangxia	7.1	2	No data	No data
Xintuyang	4.5	No data	No data	No data

Aspetti attuali e sviluppi futuri

La diffusione di questi impianti è limitata fundamentalmente dagli alti costi di costruzione e dall'impatto ambientale. In futuro può essere stimolata dall'aumento del costo di generazione delle altre fonti tradizionali.

La costruzione dello sbarramento richiede grandi quantità di materiale e il suo costo è considerato l'elemento più importante nella valutazione se un sito è economicamente idoneo o meno all'utilizzo di energia dalle maree.

Bisogna tenere conto poi che grandissimi cambiamenti saranno sostenuti dall'ambiente circostante l'impianto. Costruire una diga su un estuario o una baia cambia il flusso delle maree con effetti sulla fauna e sulla flora marina. La qualità dell'acqua nel bacino è modificata, in particolare per quanto riguarda la torbidità a causa del cambiamento nel trasporto dei sedimenti. Questo non è solo un aspetto negativo, perché il cambiamento del trasporto dei sedimenti può stimolare la nascita di vita marina in zone in cui non c'era.

La presenza dello sbarramento provoca problemi anche al traffico marittimo.

Turbine per correnti di marea

Le turbine per correnti di marea estraggono l'energia cinetica dall'acqua in movimento per generare energia elettrica. Questa tecnologia è molto simile alla tecnologia eolica.

L'acqua però è circa 800 volte più densa dell'aria e generalmente le velocità sono molto minori. Le turbine per maree sono soggette a forze e momenti maggiori rispetto alle turbine eoliche. Bisogna anche considerare che a differenza delle turbine eoliche le turbine per maree sono prossime alla superficie dell'acqua.

Esistono due tipologie di turbine:

- turbine ad asse orizzontale, le pale ruotano su di un asse parallelo alla direzione del flusso d'acqua;
- turbine ad asse verticale, le pale ruotano su di un asse perpendicolare alla direzione del flusso d'acqua.

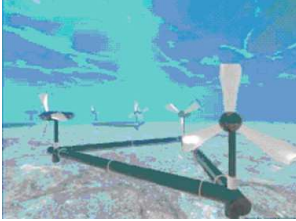
Le turbine sono composte da un rotore (pale e mozzo), un ingranaggio e un generatore. Tutto è montato su un supporto che deve sopportare le gravose condizioni ambientali.

Esistono tre tipi di supporto:

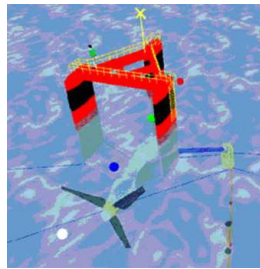
- a gravità, una grossa massa di acciaio o cemento armato alla base della turbina;
- strutture impilate, fissata al fondo del mare con travi di acciaio o cemento armato;
- strutture galleggianti, ormeggiate sul fondo del mare.

Le turbine

La tecnologia è ancora agli albori, esistono numerosi prototipi.

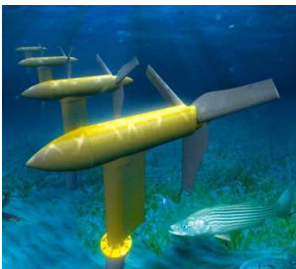


DeltaStream turbine: formata da triplete di turbine a tre pale ad asse orizzontale montate su una struttura triangolare a gravità per una potenza di 1.2 MW.



Evapod Tidal turbine: turbina a cinque pale ad asse orizzontale montata su un struttura galleggiante.

Le turbine

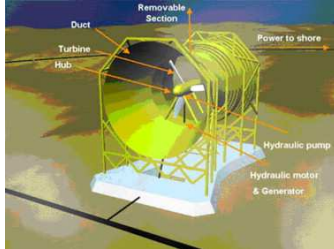


Free Flow turbine: tre pale ad asse orizzontale con un diametro di 4.68 m genera 1 MWh al giorno nell'East River di New York.



Gorlov Helical turbine: ha tre twisted-blade montate su asse verticale. Ha mostrato di essere efficiente e con ridotte vibrazioni.

Le turbine



Lunar Energy Tidal turbine: è una turbina ad asse orizzontale bidirezionale da 1 MW con struttura a gravità.



Neptune Tidal Stream device: ha una potenza di 2.4 MW e consiste in una coppia di turbine a tre pale ad asse orizzontale, può generare sia in flusso sia in riflusso.

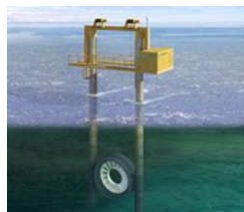
Le turbine



Nereus Tidal turbine: turbina ad asse orizzontale da 400 kW. Robusta, ha la capacità di resistere a flussi contaminati da molti detriti.

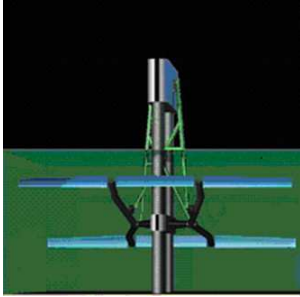


Solon Tidal turbine: turbina intubata ad asse orizzontale per acque profonde della potenza di 500 kW.



Open Centre turbine: consiste in un rotore lento di 6 metri di diametro, uno statore, un condotto e un generatore.

Le turbine

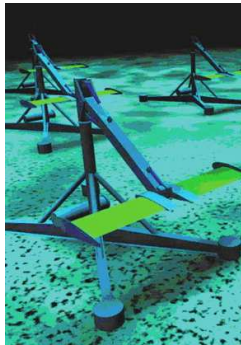


Pulse tidal Hydrofoil: il suo design gli permette di operare in acque poco profonde.

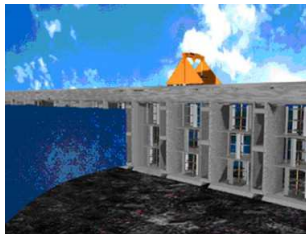


Seagen: consiste in una coppia di rotori ad asse orizzontale a due pale. I rotori sono connessi ad un ingranaggio che aumenta la velocità di rotazione per la connessione al generatore.

Le turbine

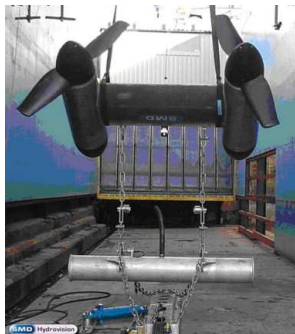


Stingray Tidal Energy converter: trasforma l'energia cinetica dell'acqua in energia idraulica



Tidal Fence Davis Hydro turbine: consiste in una serie di turbine ad asse verticale e ad una struttura statorica di quattro pale.

Le turbine



TidEl Stream generator: due rotori controrotanti di 15 m di diametro. La struttura è galleggiante ed è ancorata al fondo marino attraverso catene. L'ormeggio gli consente di orientarsi secondo la direzione della corrente.



Tidal Stream turbine: è una turbina a tre pale ad asse orizzontale da 300 kW.

Le turbine

On the 6th December 2014, the 1MW tidal stream turbine installed and connected by Alstom at the EMEC (European Marine Energy Centre) off the Orkney Islands, as part of the ReDAPT Project delivered in partnership with the Energy Technologies Institute, has produced 1 GWh for the grid. [Fonte www.alstom.com](http://www.alstom.com)



Potenziali siti

Ci sono siti per le correnti di maree che prometterebbero adeguate produzioni. I siti in cui le correnti sono maggiori di 2.5 m/s sono considerati economicamente idonei.

I siti migliori sono quelli nei quali le correnti devono passare per passaggi stretti o dove ci sono grosse maree:

- Oceano Artico
- Canale della Manica
- Mare d'Irlanda
- Skagerrak-Kattegat
- Ebridi
- Golfo del Messico
- Golfo di San Lorenzo
- Baia di Fundy
- Amazonia
- Rio de la Plata
- Stretto di Magellano
- Gibilterra
- Messina
- Sicilia
- Bosforo

Aspetti attuali e sviluppi futuri

Queste tecnologie sono limitate nello sviluppo dalle difficoltà di installazione, di manutenzione, del trasporto dell'energia elettrica, dai grossi carichi sulle strutture e dall'impatto ambientale.

Ciononostante questa possibilità sta diventando sempre più un'opzione per la generazione elettrica. Va sottolineato che comunque dei dispositivi visti solo alcuni sono stati effettivamente costruiti e sperimentati in condizioni gravose come quelle reali.