

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN**

**INGEGNERIA Elettrotecnica**

ANNO ACCADEMICO 2011 – 2012

**Le prospettive della generazione elettrica dal mare:**

**le onde, le maree, i gradienti termici**

Relatore: **Chiar.mo Prof. Arturo Lorenzoni**

Laureando: **Dal Molin Luca**

Matricola **575434**



Dedico questo elaborato alla mia famiglia  
e alla mia ragazza, che mi sono rimasti vicini  
durante questi lunghi anni di studio,  
spronandomi e incoraggiandomi nei  
momenti più difficili.



# Indice

<b>1 – INTRODUZIONE.....</b>	<b>7</b>
1.1 – CONSUMO DI ENERGIA PRIMARIA A LIVELLO MONDIALE .....	8
1.2 – ORIGINE DELLE FONTI DI ENERGIA RINNOVABILE .....	10
<b>2 – ENERGIA OCEANICA .....</b>	<b>13</b>
2.1 – CORRENTI MARINE e OCEANICHE.....	13
2.2 – CORRENTI di MAREA.....	14
2.2.1 – POTENZA ED ENERGIA DELLA CORRENTE MARINA E DI MAREA .....	15
2.3 – CARATTERISTICHE GENERALI DEL MOTO ONDOSO.....	16
2.3.1 – CALCOLO DELLA POTENZA DEL MOTO ONDOSO .....	18
2.4 – GRADIENTE TERMICO.....	20
<b>3 – SITI EUROPEI PER TESTARE I PROTOTIPI.....</b>	<b>23</b>
3.1 – SITI ESISTENTI IN EUROPA.....	24
3.2 – SITI FUTURI IN EUROPA .....	25
<b>4 – PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA CORRENTI MARINE E DI MAREA.....</b>	<b>27</b>
4.1 – IMPIANTI A BARRIERA.....	27
4.1.1 – PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	27
Sistemi a singolo bacino .....	27
Sistemi a doppio bacino .....	28
4.1.2 – STATO CORRENTE E SVILUPPI FUTURI .....	29
4.1.3 – IMPATTO AMBIETALE DEI SISTEMI A BARRIERA.....	30
4.2 – LA RANCE TIDAL POWER PLANT .....	30
4.2.1 – CARATTERISTICHE GENERALI .....	30
4.2.2 – IMPIANTO ELETTRICO .....	32
4.2.3 – MODALITÀ DI GENERAZIONE DI ENERGIA.....	33
4.2.4 – COSTO DELL'ENERGIA.....	35
4.2.5 – PROBLEMATICHE GENERALI .....	35
4.2.6 – IMPATTO AMBIENTALE.....	35

4.2.7 – INTEGRAZIONE DELLA STRUTTURA.....	35
4.3 – TURBINE MARINE .....	36
4.3.1 – PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	36
4.3.2 – STATO CORRENTE .....	36
4.3.3 – SVILUPPI FUTURI .....	43
<b>5 – PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA MOTO ONDOSO .....</b>	<b>45</b>
5.1 – FENOMENI SFRUTTABILI .....	45
5.1.1 – COLONNA D’ACQUA OSCILLANTE.....	45
5.1.2 – DISPOSITIVI CON APPARATI GALLEGGIANTI .....	46
5.1.3 – SISTEMI CON IMPIANTI SOMMERSI .....	46
5.1.4 – SISTEMI DI SUPERFICIE CON BACINO DI RACCOLTA.....	47
5.2 – STATO CORRENTE .....	47
5.3 – DISPOSITIVI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA MOTO ONDOSO ...	47
5.4 – SVILUPPI FUTURI.....	53
<b>6 – PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA GRADIENTE TERMICO .....</b>	<b>55</b>
6.1 – CICLI UTILIZZATI .....	55
6.2 – STATO CORRENTE .....	58
6.3 – PRINCIPALI IMPIANTI.....	58
6.4 – SVILUPPI FUTURI.....	58
<b>7 – COSTI ATTESI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DAL MARE .....</b>	<b>59</b>
7.1 – SUDDIVISIONE DEI COSTI .....	59
Costi di investimento.....	59
Costi di esercizio e manutenzione.....	60
Prestazioni del dispositivo .....	61
7.2 – COSTI ATTUALI.....	61
7.3 – COSTI FUTURI ENERGIA DA MOTO ONDOSO .....	63
7.3.1 – SCENARIO 1 (lento sviluppo tecnologico) .....	63
7.3.2 – SCENARIO 2 (veloce sviluppo tecnologico).....	64
7.3.3 – SCENARIO 3.....	65
7.4 – COSTI FUTURI ENERGIA DA CORRENTI MARINE E DI MAREA.....	66

<b>8 – PRINCIPALI COLLABORAZIONI CON GRANDI COMPAGNIE DI DISTRIBUZIONE .....</b>	<b>67</b>
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>71</b>





## **Lista dei simboli:**

- WEC: wave energy converter (dispositivi che convertono l'energia del moto ondoso);
- OTEC: ocean thermal energy conversion (conversione dell'energia del gradiente termico).



## 1 – INTRODUZIONE

Lo sviluppo sostenibile è definito come sviluppo in grado di durare, cioè in grado di soddisfare le necessità attuali senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie. Lo sviluppo sostenibile comprende tre dimensioni: sostenibilità economica, ambientale e sociale. Con la domanda di energia in costante crescita, soddisfatta per la maggior parte da fonti fossili, si sta mettendo a rischio la sostenibilità ambientale. Con lo scopo di diminuire l'impatto ambientale, si sono sviluppate negli anni diverse tecnologie per lo sfruttamento delle energie rinnovabili. Tra le più avanzate e competitive ci sono sicuramente l'energia solare, eolica, idraulica e geotermica. Oltre a queste, esistono anche altre diverse fonti rinnovabili, come vedremo in seguito, meno note perché meno sfruttate. In questa categoria è compresa l'energia oceanica. Come vedremo in seguito, si sta facendo molto per arrivare a sfruttare questa immensa fonte di energia con costi competitivi almeno con le altre fonti rinnovabili. In particolare si stanno sviluppando soprattutto dispositivi che sfruttano le correnti marine e di marea, e il moto ondoso. Non esistono ad oggi impianti di produzione che convertono energia oceanica in energia elettrica, ma vari prototipi si stanno testando in diverse parti del mondo, prevalentemente in Europa, Stati Uniti e Canada.

In questo elaborato si è cercato di dare una panoramica generale sullo stato attuale della tecnologia, mostrando i dispositivi che attualmente sono più sviluppati, descrivendone a grandi linee il funzionamento di base e il principio secondo il quale convertono l'energia oceanica. Alcune informazioni contenute potrebbero risultare già superate fra alcuni mesi a causa del forte sviluppo di questo settore .

In questa introduzione si è voluto dare una breve panoramica sul consumo di energia mondiale e sulle fonti rinnovabili disponibili in natura. Nel secondo capitolo viene descritta in particolare l'energia oceanica, illustrando ogni fonte di cui è composta. Viene inoltre quantificata l'energia disponibile nell'oceano, immagazzinata sotto diverse forme. Nel terzo capitolo vengono brevemente descritti i siti europei in cui vengono testati i vari prototipi, fase fondamentale per lo sviluppo di un determinato dispositivo. Nel quarto capitolo, viene affrontato il tema della produzione di energia elettrica da correnti marine e di marea, passando dagli impianti a barriera alle turbine marine. Viene descritto più approfonditamente l'impianto a barriera a La Rance in Francia. Vengono invece descritti brevemente i prototipi più avanzati di turbine marine, con uno sguardo allo stato attuale e agli sviluppi futuri. Si trova nel quinto capitolo la descrizione della produzione di energia elettrica da moto ondoso, con la presentazione dei vari prototipi realizzati e in fase di sviluppo, ed uno sguardo al futuro riguardante il settore. Nel sesto capitolo si descrive la produzione di energia elettrica sfruttando il gradiente termico presente tra acque superficiali e acque in profondità, esponendo i diversi cicli utilizzati e i piccoli impianti dimostrativi realizzati. Il

settimo capitolo è dedicato ad uno studio sui costi attuali e futuri dell'energia elettrica prodotta sfruttando le correnti marine e di marea e il moto ondoso, confrontandoli con i costi delle fonti convenzionali. Nell'ottavo capitolo è presente una breve tabella con le principali compagnie elettriche che sono coinvolte nel settore trattato in questo elaborato.

## 1.1 – CONSUMO DI ENERGIA PRIMARIA A LIVELLO MONDIALE

Il consumo di energia primaria a livello mondiale rappresenta la totale energia richiesta per lo svolgimento di tutte le attività umane.

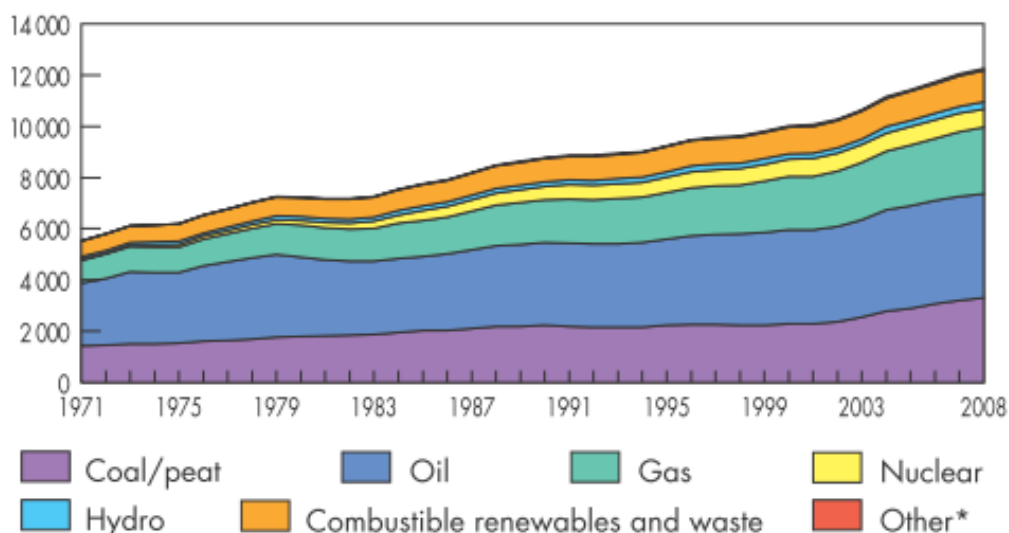
L'energia primaria è quella disponibile in natura e in qualche caso viene utilizzata direttamente, ma più spesso viene trasformata in energia secondaria, più adatta al trasporto o alla trasmissione (caratteristiche di vettore energetico) rispetto all'energia primaria.

Le fonti di energia primaria si distinguono in fonti primarie esauribili e fonti primarie rinnovabili.

Delle prime fanno parte i combustibili fossili e l'energia nucleare, mentre nel secondo caso, sono considerate rinnovabili l'energia solare, eolica, geotermica, biomassa, oceanica (da moto ondoso, gradiente termico, correnti marine e maree), e altre ancora.

Dai grafici possiamo notare che la richiesta di energia primaria è in continuo aumento (soprattutto a causa dei paesi emergenti, immagine 1.2), anche se negli ultimi anni la crescita è stata leggermente più lenta a causa della crisi economica.

La sempre crescente quantità di energia richiesta mette in pericolo la sostenibilità ambientale, poiché gran parte della domanda è soddisfatta da combustibili fossili (immagine 1.1), che sono la causa principale dell'effetto serra antropico (cioè causato dalle attività umane).



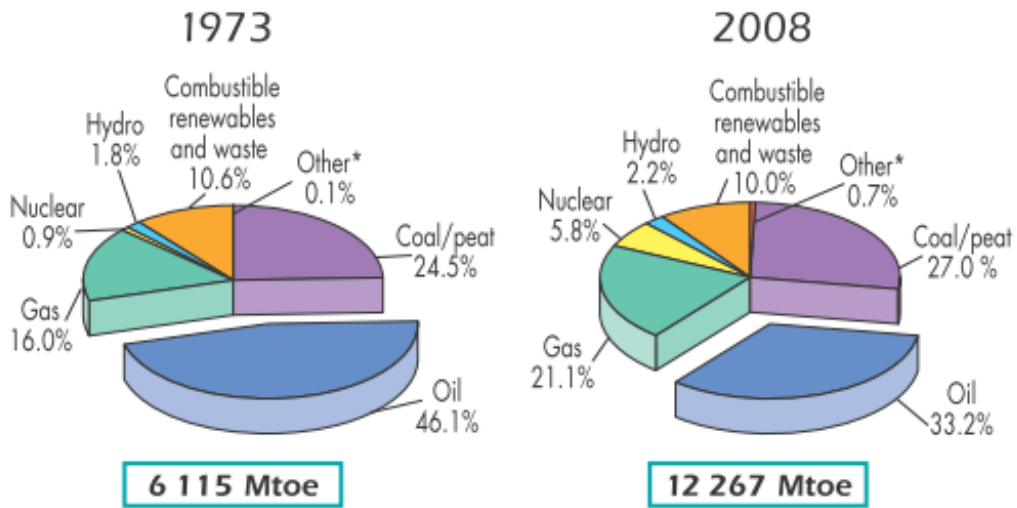


Figura 1.1 - Evoluzione della domanda di energia primaria secondo le diverse fonti [Mtoe]

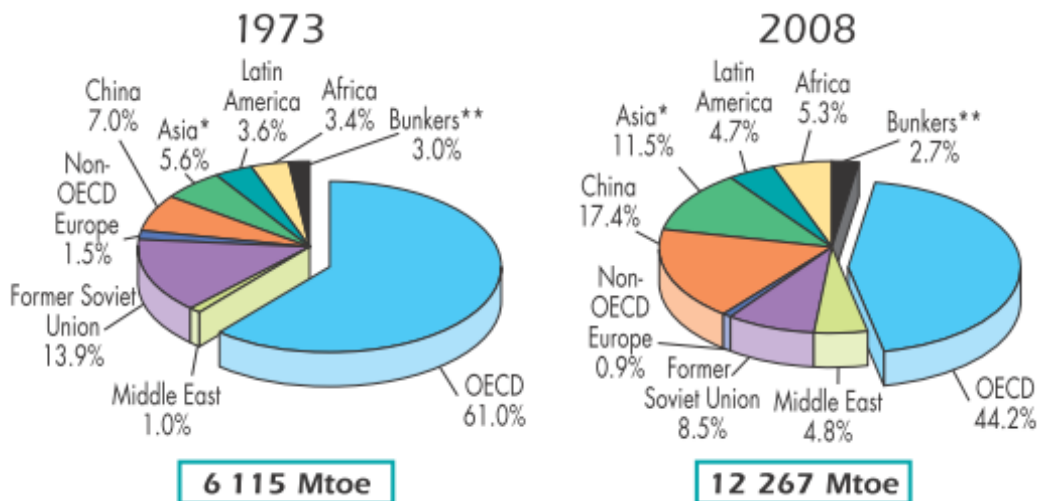
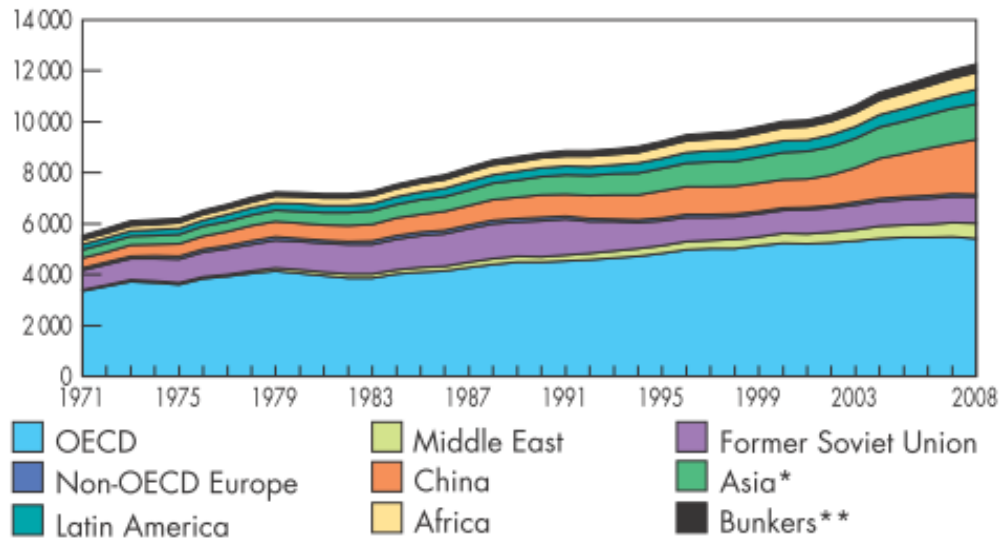


Figura 1.2 - Evoluzione della domanda di energia primaria secondo la zona geografica

Tra le conseguenze dell'effetto serra antropico ci sono il possibile aumento della temperatura media terrestre e l'innalzamento del livello del mare (dallo studio eseguito dall'IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change).

Negli scenari della IEA (International Energy Agency), per contenere il livello di gas serra (in termini di anidride carbonica equivalente) in atmosfera a 450 ppm (soglia entro la quale i cambiamenti climatici dovrebbero essere limitati), è necessaria una politica energetica di livello mondiale, mirata a migliorare soprattutto l'efficienza di edifici e apparecchiature, favorire lo sviluppo delle energie a bassa emissione di CO<sub>2</sub> (nucleare e rinnovabili), implementare la cattura e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> nelle centrali per la produzione di energia elettrica da carbone e gas e l'utilizzo di biocombustibili.

Per garantire quindi la sostenibilità ambientale è necessaria una cooperazione a livello mondiale, fondamentale per raggiungere un buon compromesso tra la qualità della vita e il mantenimento dell'ecosistema.

### **1.2 – ORIGINE DELLE FONTI DI ENERGIA RINNOVABILE**

L'origine di tutte le forme di energia rinnovabile è la radiazione solare.

La radiazione solare viene definita come una potenza per unità di superficie, e viene anche chiamata costante solare ( $K_s$ ). Il suo valore medio è circa 1353 W/m<sup>2</sup>; viene misurata sulla superficie superiore dell'atmosfera terrestre, su un piano perpendicolare ai raggi solari.

Considerando che la terra ha una sezione trasversale pari a circa 127.400.000 km<sup>2</sup>, la totale potenza fornita dal sole è pari a 1,74E17 W. Non tutta questa potenza però raggiunge la superficie terrestre: infatti il 40% circa viene assorbita o riflessa dalle nubi e il 15% circa viene assorbita dall'atmosfera stessa. Quindi arriva sulla superficie terrestre il 45% circa della totale potenza (circa 78E15 W).

Attraverso processi di trasformazione questa energia si converte fino a diventare, per esempio, energia eolica.

Sono considerate energie rinnovabili, secondo la direttiva Europea 2009/28/CE, le seguenti:

- eolica;
- solare;
- aerotermica (energia accumulata nell'aria ambiente sotto forma di calore);
- geotermica (energia immagazzinata sotto forma di calore sotto la crosta terrestre);
- idrotermica (energia immagazzinata sotto forma di calore nelle acque superficiali);
- oceanica;
- idraulica;

## Capitolo 1 - Introduzione

- biomassa (frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura, dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani;);
- gas di discarica;
- gas residuati dai processi di depurazione;
- biogas.

Non tutte queste sono originate dalla radiazione solare, ma sono comunque considerate rinnovabili in quanto non derivano dall'uso di fonti fossili.

Non tutte le tecnologie per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili sono mature; le più competitive sono l'eolica, la geotermica e l'idraulica.

Le problematiche connesse all'uso di energie rinnovabili sono essenzialmente la loro imprevedibilità nel tempo e l'impatto ambientale, inteso come utilizzo di vaste superfici e impatto visivo (per esempio torri eoliche o campi fotovoltaici).





## 2 – ENERGIA OCEANICA

Con il termine energia oceanica (o energia marina o pelagica) si intende l'energia presente in varie forme nei mari e negli oceani.

Si distinguono in particolare:

- energia delle correnti marine;
- energia del gradiente salino (osmotica);
- energia mareomotrice (o delle maree);
- energia del moto ondoso;
- energia talassotermica (OTEC: ocean thermal energy conversion).

L'energia elettrica ricavabile dalla trasformazione di queste fonti, con le tecnologie attualmente disponibili, è quantificabile in (RENEWABLE ENERGY: RD&D Priorities della IEA):

- 200 TWh/a per le maree;
- 2000 TWh/a per il gradiente salino;
- più di 800 TWh/a per le correnti marine;
- dagli 8000 agli 80000 TWh/a per il moto ondoso;
- 10000 TWh/a per il gradiente termico.

Per confronto ricordiamo che nel 2008 sono stati prodotti circa 20181 TWh di energia elettrica nel mondo, prevalentemente da fonti fossili (dati IEA). Da questo dato possiamo comprendere come l'energia oceanica possa dare un importante contributo nella produzione di energia elettrica; sicuramente non in tempi brevi poiché molte di queste tecnologie sono ancora in fase di studio o in fase di prototipo.

### 2.1 – CORRENTI MARINE e OCEANICHE

Con correnti marine si indica, correntemente, il movimento di masse d'acqua non collegato alla corrente di marea od al moto ondoso, capaci di smuovere o trasportare importanti quantità di sedimenti. Le correnti esistono lungo tutta la massa d'acqua, e talvolta solo in determinati strati senza causare effetti visibili in superficie. Tali correnti si verificano prevalentemente in acque profonde ed in mari aperti. Inoltre, mentre le correnti di marea hanno un ciclo temporale ben definito, le correnti marine sono permanenti (o stazionarie) oppure stagionali (o semipermanenti). Esistono diversi tipi di correnti marine e possono essere classificate:

- in base alle cause che le creano (correnti di gradiente, di deriva, tidali e correnti geostrofiche);

- in relazione alla temperatura dell'acqua che si sposta confrontata con la temperatura dell' acqua che la circonda (correnti calde o fredde);
- in relazione alla profondità ove si verificano (superficiali se interessano lo strato d'acqua dalla superficie ai 200 metri; interne se interessano lo strato d'acqua al di sotto dei 200 metri; di fondo se interessano lo strato d'acqua vicino al fondale marino).

### **2.2 – CORRENTI di MAREA**

L'energia delle maree è l'energia dissipata dal movimento delle maree, che derivano direttamente dalle forze gravitazionali e centrifughe tra la terra, la luna e il sole. Una marea è la regolare salita e discesa del livello dell'oceano dovuta alle forze gravitazionali del sole e della luna sulla terra e la forza centrifuga prodotta dalla rotazione della terra. La forza gravitazionale della luna, vista la sua vicinanza dalla terra, è 2,2 volte più grande della forza gravitazionale del sole.

Il fenomeno delle maree si verifica due volte ogni 24 ore, 50 minuti e 28 secondi. Un ammasso d'acqua viene creato dalla spinta gravitazionale della luna, che è maggiore sulla parte della terra più vicina alla luna. Allo stesso tempo la rotazione del sistema terra-luna, produce una forza centrifuga, che causa un altro ammasso d'acqua sulla parte della terra più lontana dalla luna, come illustrato nell'immagine 1.3. Quando una massa (continente) si allinea con il sistema terra-luna, l'acqua attorno al continente è in alta marea, quando un continente si trova a  $90^\circ$  rispetto al sistema terra-luna, l'acqua è in bassa marea. Quindi, ogni continente è investito da due alte maree e due basse maree durante un periodo di rotazione della terra. Dato che la luna ruota attorno alla terra, ogni giorno le maree si verificano 50 minuti più tardi rispetto a quelle del giorno precedente. La luna orbita intorno alla terra in 29,5 giorni; questo tempo è anche conosciuto come ciclo lunare. La dimensione delle maree varia con la posizione reciproca dei corpi celesti terra-sole-luna. Quando il sole e la luna si allineano con la terra, si verificano maree di grandi dimensioni. Mentre quando la luna si trova in quadratura rispetto alla linea terra-sole, si verificano maree di limitata estensione.

Le correnti di marea si verificano in aree costiere e in luoghi in cui l'acqua è forzata a fluire attraverso canali stretti. Queste correnti si muovono in due direzioni: la corrente che si muove in direzione della costa è conosciuta come corrente di marea e la corrente che si allontana dalla costa viene chiamata corrente di riflusso. La velocità della corrente in entrambe le direzioni varia da zero ad un valore massimo. La corrente ha velocità zero nei periodi morti, che si verificano tra la bassa e l'alta marea.

Queste variazioni delle correnti, sia l'alzarsi che l'abbassarsi della marea e l'alta e bassa marea, possono essere utilizzate per la produzione di energia elettrica, nel primo caso sfruttando le

correnti dovute allo spostamento della massa d'acqua, nel secondo caso accumulando la massa d'acqua che si alza con l'alta marea.

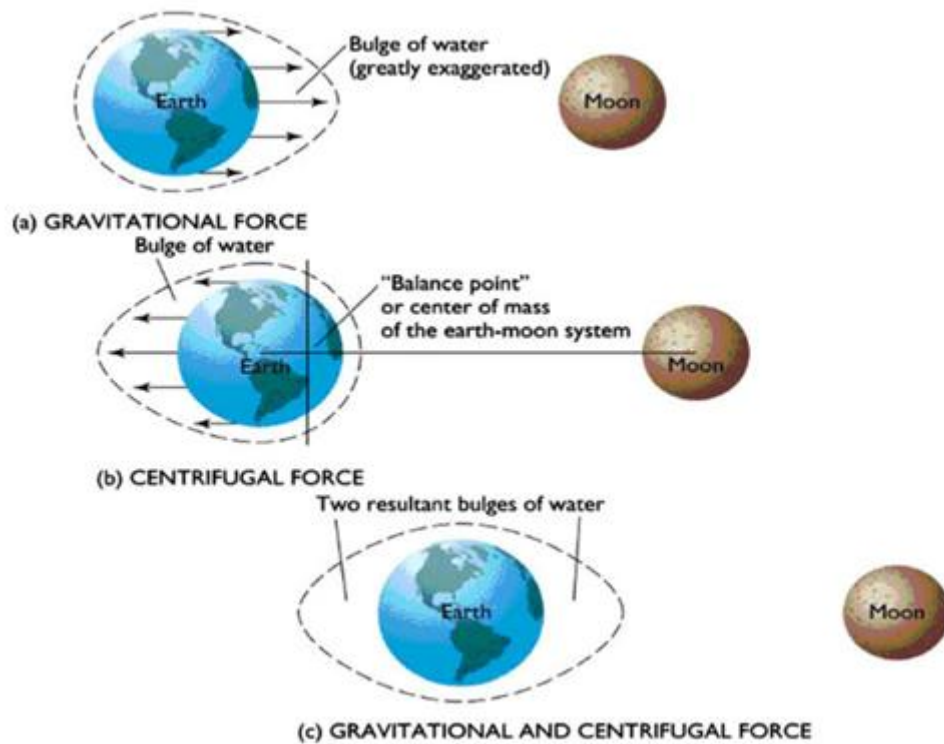


Figura 2.1 - Forza centrifuga e gravitazionale causa di maree

### 2.2.1 – POTENZA ED ENERGIA DELLA CORRENTE MARINA E DI MAREA

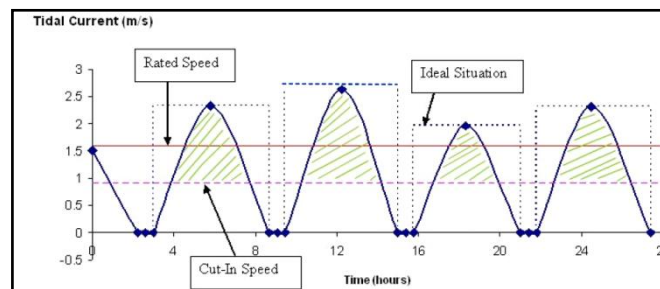
La potenza teorica associata al flusso di un fluido si calcola con la teoria di Betz. Definendo  $\rho$  la densità del fluido,  $V$  la sua velocità ed  $S$  la sezione ortogonale al flusso, la potenza teorica viene così calcolata:

$$\text{POTENZA TEORICA} = \frac{1}{2} \rho V^3 S \text{ [W]}$$

Solitamente è più comodo esprimere la potenza teorica rispetto alla superficie unitaria, esprimendola cioè in  $\text{kW/m}^2$ .

In questo modo, conoscendo l'andamento della velocità nel tempo e la superficie individuata dal rotore, oltre che la densità del fluido, è possibile calcolare l'energia teorica del flusso integrando la potenza teorica nel tempo.

L'andamento qualitativo di una corrente di marea è la seguente:



Il tempo è sull'asse delle ascisse, mentre la velocità del flusso è sull'asse delle ordinate. I punti in cui la velocità è prossima allo zero, sono quelli in cui si ha l'inversione della direzione del flusso. Ovviamente più grande è l'area sottesa dalla curva maggiore è l'energia teorica. Tuttavia le turbine marine non entrano in funzione ad una qualsiasi velocità del flusso, ma solo quando questa supera un certo valore, solitamente intorno a 1m/s (Cut-In speed, linea rosa tratteggiata). Questo comporta che solo una parte della totale energia teorica possa essere estratta (rappresentata dalle aree con linee verdi).

Un grande vantaggio derivante dallo sfruttamento delle correnti di marea è che è possibile calcolare in maniera semplice e molto accurata l'energia teorica disponibile annualmente per unità di superficie nel sito in cui sarà installata la turbina. Questo consente un notevole risparmio in termini economici e tempi di messa in opera minori rispetto ad una turbina eolica, per la quale sono invece necessarie lunghe e costose campagne anemometriche per individuare il sito adatto, che influiscono negativamente sul costo finale del kWh prodotto.

## 2.3 – CARATTERISTICHE GENERALI DEL MOTO ONDOSO

L'energia delle onde è derivata dai venti che soffiano da una parte all'altra degli oceani, e questo trasferimento di energia fornisce una conveniente e naturale concentrazione di energia eolica nell'acqua vicino alla superficie. Una volta formate, le onde possono viaggiare per migliaia di chilometri con piccole perdite di energia. Quindi, onde create in una parte americana dell'oceano Atlantico viaggeranno verso la costa occidentale dell'Europa, supportate da venti prevalentemente da ovest verso est. I flussi di energia che si verificano in acque profonde possono essere molto grandi. La potenza in un'onda è proporzionale al quadrato dell'ampiezza e del periodo del movimento. Quindi, onde con lungo periodo (7-10 s) e grande ampiezza (2 m) hanno un flusso di energia medio compreso tra 40 e 70 kW per metro di larghezza dell'onda in arrivo. Più vicino alla costa l'intensità energetica media dell'onda diminuisce a causa dell'interazione con il

fondale marino. La dissipazione di energia nelle zone vicine alla riva può essere compensata da fenomeni naturali come rifrazione o diffrazione, che portano a concentrazioni di energia (hot spot). Grazie alla posizione geografica, la costa occidentale dell'Europa è caratterizzata da un'energia particolarmente elevata. Solo la parte meridionale del Sud America possiede un'energia del moto ondoso superiore, grazie a tempeste circumpolari vicine all'atlantico. Recenti studi assegnano per l'area nord-est atlantica (incluso il mare del Nord) una potenza disponibile di moto ondoso di circa 290 GW. Il livello di potenza del moto ondoso durante l'anno varia dai circa 25 kW/m della parte più meridionale dell'Europa (isole Canarie) fino ai 75 kW/m di Irlanda e Scozia. Più a nord il livello diminuisce a 30 kW/m nella parte nord della costa norvegese. Nel mare del Nord, la risorsa cambia significativamente, variando dai 21 kW/m nell'area più esposta a nord fino a metà del precedente valore nell'area più a sud (maggiormente riparata). Nel bacino del Mar Mediterraneo il livello di potenza varia annualmente tra 4 e 11kW/m, il più alto valore si verifica nell'area sud-ovest del mar Egeo. L'intera potenza disponibile annualmente nelle coste europee nel bacino del Mediterraneo è nell'ordine dei 30 GW, quindi la totale potenza disponibile per l'Europa risulta pari a circa 320 GW. È importante capire le difficoltà di fronte allo sviluppo dei dispositivi per la cattura di questa energia, tra queste le più importanti sono:

- L'irregolarità nell'ampiezza, periodo e direzione dell'onda; è difficile ottenere la massima efficienza del dispositivo per tutte le frequenze di eccitazione
- Le sollecitazioni della struttura in caso di condizioni meteorologiche estreme, come uragani, possono essere anche cento volte superiori alle normali sollecitazioni
- L'accoppiamento con l'irregolare e lento scorrere delle onde (frequenze di circa 0,1 Hz) a generatori elettrici che richiedono frequenze circa cinquecento volte superiori.

È apparente quindi che il design di un dispositivo per la conversione dell'energia del moto ondoso è molto sofisticato per essere efficace e affidabile da una parte, e poco costoso dall'altra. Come per tutte le fonti rinnovabili, la disponibilità e la variabilità della risorsa in un certo sito di installazione deve essere determinata anticipatamente. I trend attuali si stanno portando su dispositivi di moderata potenza di generazione fino a 1.5-2 MW, o sistemi modulari di piccola potenza, 5-20kW, che possono raggiungere grandi potenze se collegati tra di loro.

L'energia delle onde è generalmente considerata una fonte rinnovabile pulita, con un limitato impatto ambientale. In particolare è vista come grande risorsa di energia che non comporta grandi emissioni di CO<sub>2</sub>. La limitata esperienza con questo tipo di energia consente solamente di formare uno schema incompleto dei possibili effetti negativi che si avrebbero sull'ambiente marino con lo sfruttamento di questa fonte di energia.

Il principale ostacolo per ottenere questa energia è proprio il mare. Come già detto precedentemente, la differenza tra le sollecitazioni medie e quelle più alte che il dispositivo

potrebbe dover sostenere è troppo grande, ed è difficile prevedere accuratamente l'energia che sarà disponibile nel lungo periodo in un certo sito a causa dei pochi anni di misure effettuate. Il risultato porta a una sottostima o una sovrastima delle sollecitazioni che il dispositivo dovrà sopportare. Nel primo caso è facile aspettarsi la distruzione totale o parziale delle strutture. Nel secondo caso invece, gli alti costi di produzione si riflettono sul costo di generazione, che rende la tecnologia non competitiva.

Questo ha contribuito a rallentare lo sviluppo dei dispositivi per lo sfruttamento di questa energia. I vantaggi che derivano dall'uso dell'energia del moto ondoso sono ovvi, lo sviluppo è sostenibile, poiché combina fattori economici, ambientali, etici e sociali. L'abbondanza della risorsa e gli alti flussi di energia nel mare consigliano, con un appropriato design dei dispositivi, una strada per una produzione economica dell'energia. Un particolare vantaggio nello sfruttare questa energia è il fatto che l'impatto ambientale è limitato, la variabilità di questa fonte dovuta al susseguirsi delle stagioni che segue la domanda energetica, e l'introduzione di generatori sincroni con controllo della potenza reattiva. Come per la maggior parte delle fonti di energia rinnovabile, lo sfruttamento dell'energie del moto ondoso nel sito implica la diversificazione del lavoro, e la sicurezza nella fornitura di energia per le regioni più remote. Inoltre la diffusione su larga scala di questi dispositivi porterà alla creazione di nuovi posti di lavoro, e uno stimolo alle industrie, per esempio a quelle del settore della costruzione di imbarcazioni.

### 2.3.1 – CALCOLO DELLA POTENZA DEL MOTO ONDOSO

Considerando un breve periodo di tempo, le caratteristiche del moto ondoso rimangono costanti. Per descrivere questo stato e determinarne le caratteristiche più rilevanti, si fa uso di parametri statistici derivanti dallo studio dello spettro delle onde. I parametri di altezza e periodo d'onda più comunemente utilizzati sono:

- Altezza d'onda significativa  $H_s$  definita come l'altezza media di un terzo delle onde più alte. In questo modo si trascurano le onde più piccole e meno importanti.
- Periodo  $T_e$  definito come periodo medio. Il periodo di picco  $T_p$  rappresenta la componente alla cui frequenza si ha il picco di potenza.

In acque profonde, la potenza in ognuno degli stati del mare (quando le caratteristiche del moto ondoso rimangono pressoché costanti) è data da:

$$P = 0.5H_s^2T_e$$

con  $H_s$  espresso in metri e  $T_e$  in secondi.

Per determinare a lungo termine l'energia che sarà disponibile in un determinato sito esistono due metodologie. La prima è basata su misure e osservazioni, la seconda sulla costruzione di modelli matematici che coinvolgono l'interazione tra il vento e le onde.

Le osservazioni sono basate sulla mera osservazione delle onde, riportando i dati caratteristici di vento e onde, come periodo, altezza e direzione. Tutti i dati vengono poi raccolti e archiviati. Le informazioni ricavate in questo modo sono abbastanza affidabili, ma affette comunque da errori. Sono generalmente utilizzate come supplemento ad altri metodi di misurazione.

Esistono diversi metodi per effettuare misurazioni delle caratteristiche del moto ondoso. La scelta del metodo più adatto coinvolge numerosi fattori, come profondità dell'acqua e dati da ottenere a seguito della misurazione. Solitamente in mare aperto si usano delle boe che registrano il moto ondoso (intensità o direzione); da questa registrazione si possono calcolare diversi parametri, tra i quali per esempio l'altezza d'onda, direzione e periodo.

Si possono inoltre utilizzare anche sistemi di misurazione come foto aeree (per identificare fenomeni come rifrazione o rifrazione), radar (direzione del moto) e satelliti (altezza d'onda e direzione).

In vicinanza della costa le misurazioni possono essere eseguite anche con altri dispositivi oltre alle boe, per esempio sonde acustiche o di pressione, misuratori di corrente, sensori orbitali di velocità. Le misure effettuate con modelli matematici sono solitamente riferite a una certa area data. L'input principale è l'intensità del vento. Questo tipo di misurazione è molto complessa, in quanto piccole variazioni nell'intensità del vento comportano variazioni molto più grandi nel moto ondoso; di conseguenza è semplice commettere grandi errori. L'accuratezza è anche funzione del bacino considerato e della complessità topografica del confine considerato.

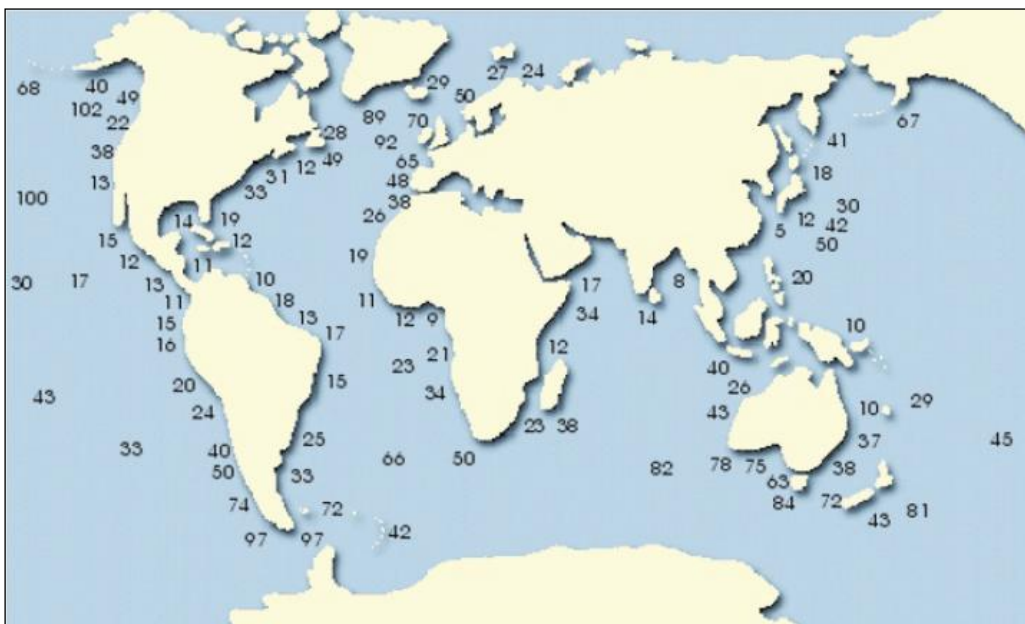


Figura 2.2 - Livello medio annuale di potenza del moto ondoso [kW/m]

## 2.4 – GRADIENTE TERMICO

La luce del sole che cade sopra gli oceani viene fortemente assorbita dall'acqua, ed effettivamente tutta la sua energia viene catturata nello strato superficiale, con uno spessore che va da 35m a 100m, dove l'azione delle onde e del vento rendono la temperatura e la salinità dell'acqua pressoché uniforme. Nelle zone tropicali degli oceani comprese all'incirca dai 15° gradi nord e i 15° sud di latitudine, il calore assorbito dal sole riscalda l'acqua nello strato superficiale fino al valore di circa 28°C che si mantiene abbastanza costante tra notte e giorno e tra mese e mese. La temperatura annuale media dello strato superficiale nelle varie regioni varia da 27°C a 29°C. Al di sotto dello strato superficiale, l'acqua diventa più fredda all'aumentare della profondità fino a 800-1000 metri, dove viene raggiunta una temperatura di 4,4°C. Al di sotto di questa profondità, la temperatura diminuisce ulteriormente di pochi gradi fino ad una profondità media di 3650 metri. In questo modo, esiste una grande riserva di acqua fredda al di sotto dei 1000 metri. Quest'acqua deriva dallo scioglimento dei ghiacci nelle regioni polari. A causa della sua alta densità e della minima interazione con l'acqua più calda presente sullo strato superiore, l'acqua più fredda fluisce lungo il fondale dell'oceano dai poli all'equatore, sostituendo l'acqua superiore a densità più bassa. Il risultato di questi due processi fisici è quello di creare una struttura oceanica con una grande riserva di acqua calda sulla superficie e una grande riserva di acqua fredda nello strato sottostante, con una differenza di temperatura compresa tra 22 e 25 gradi centigradi; questa struttura si può trovare attraverso l'intera area degli oceani tropicali dove la profondità è maggiore di 1000 metri. La differenza di temperatura è costante durante l'anno, con variazione di pochi gradi dovuta all'effetto delle stagioni e delle condizioni atmosferiche, e da giorno a notte varia dell'ordine di un grado.

Il processo di conversione dell'energia termica oceanica (OTEC) sfrutta questa differenza di temperatura per operare un ciclo termico, che produce energia elettrica. Calcoli mostrano che impianti per la conversione di questa energia negli oceani tropicali possono operare continuamente, senza significativi impatti ambientali, se la potenza di generazione è limitata a circa 0,19 MWe per chilometro quadrato. Questa quantità corrisponde alla conversione dello 0,07% dell'energia media assorbita dal sole in elettricità.

Esistono mappe che mostrano la differenza di temperatura tra la superficie e lo strato sottostante, e le zone in cui l'oceano ha una profondità minore ai 1000 metri. Le zone più adatte per lo sfruttamento di questa energia sono quelle in cui la differenza di temperatura supera i 22°C, e corrispondono a una superficie totale di circa 60 milioni di chilometri quadrati. Quindi, se impianti OTEC galleggianti fossero uniformemente distribuiti nell'area degli oceani tropicali, la totale potenza generabile potrebbe superare i 10 milioni di MWe; se ogni impianto generasse 200MWe di potenza netta, questi sarebbero distanziati tra loro di 32 km. Per confronto si ricorda che la capacità di produzione di energia elettrica degli Stati Uniti è pari a 1121 GW.



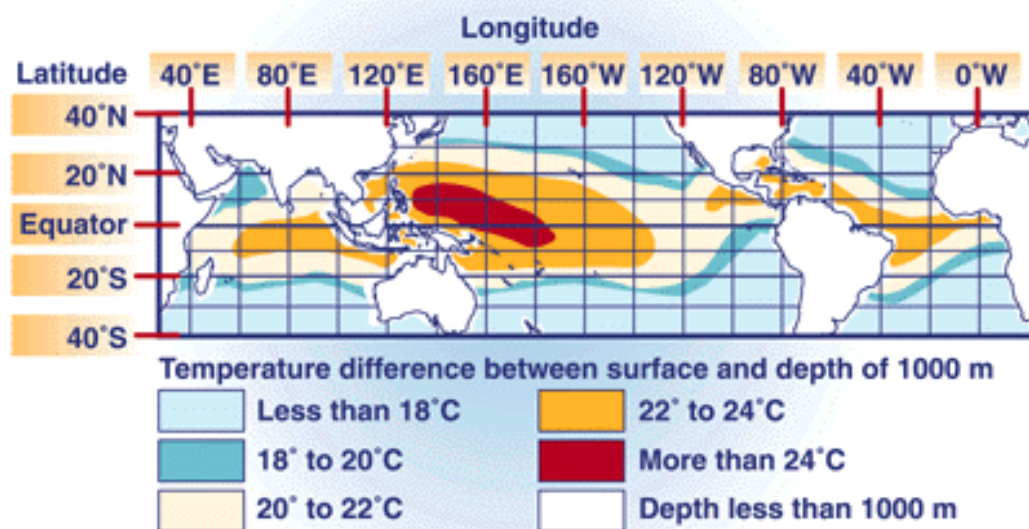


Figura 2.3 - Differenza di temperatura tra acque superficiali e acque alla profondità di 1000 metri



### 3 – SITI EUROPEI PER TESTARE I PROTOTIPI

Ad un certo punto dello sviluppo del dispositivo si giunge alla fase in cui è necessario testare il prototipo in mare, per verificarne il corretto funzionamento e l'affidabilità. Durante gli ultimi anni sono stati sviluppati diversi siti per i sistemi di conversione dell'energia oceanica in generale. La mappa sottostante indica alcuni di questi siti, alcuni dei quali sono prossimi all'installazione di alcuni dispositivi.

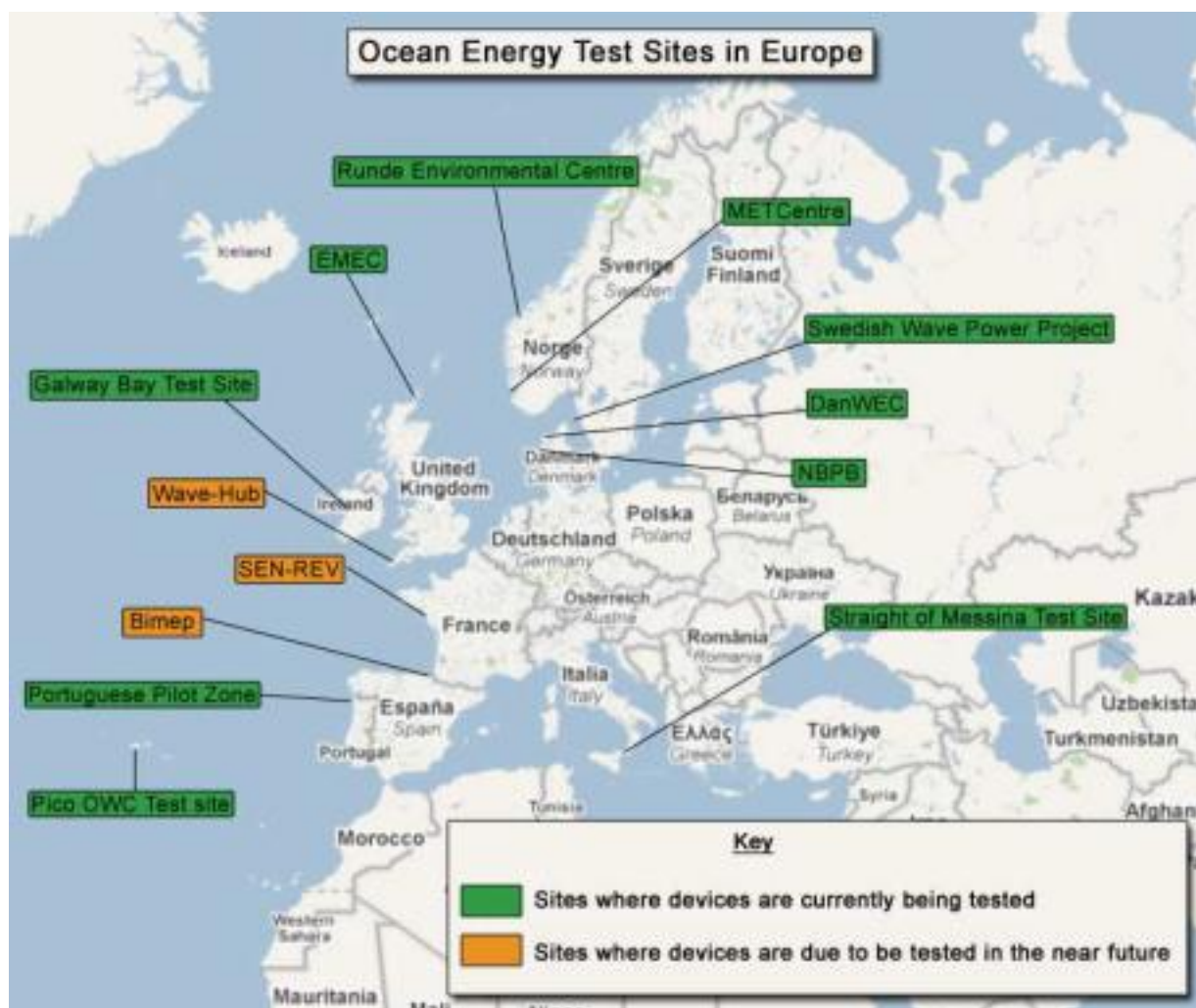


Figura 3.1 - Locazione dei siti per i test

Uno dei primi siti creati è stato l'European Marine Energy Centre (EMEC) vicino all'isola di Orkney in Scozia

### 3.1 – SITI ESISTENTI IN EUROPA

#### *European Marine Energy Centre (EMEC), Scozia*

È l'unico centro con possibilità di collegare il dispositivo in prova alla rete elettrica. Il sito è diviso in due infrastrutture, una specializzata per le prove sulle turbine marine, la seconda invece sui test per i dispositivi che convertono il moto delle onde in energia elettrica. La zona presenta ottime condizioni per sfruttare l'energia delle onde e delle maree

#### *The Portuguese Maritime Pilot Zone, Portogallo*

È situato al largo della costa di Aguçadoura. La zona è stata scelta con lo scopo di limitare al massimo l'eventuale impatto ambientale che i dispositivi potrebbero causare. In questo modo si semplificano anche le procedure per la richiesta delle autorizzazioni necessarie.

#### *The Danish Nissum Bredning Test Station for Wave Energy (NBPB), Danimarca*

Situato a Nissum Bredning, fu costruito nel 200. Da la possibilità agli sviluppatori di testare i loro dispositivi dove la forza delle onde non è eccessiva. Il sito è quindi ideale per effettuare i primi test necessari.

#### *Galway Bay Wave Test Site, Irlanda*

Opera dal marzo del 2006, situato nella parte nord della Galway Bay. Le dimensioni del sito e la profondità dell'acqua, circa venti metri, lo rendono adatto per ospitare prototipi in scala compresa da 1 a 3 a 1 a 5.

#### *The Runde Environmental Centre and Marine Energy Test Centre (METCentre), Norvegia*

Il primo è situato nell'isola di Runde. Ospita un centro per lo studio degli effetti sull'ambiente di queste tecnologie.

Il secondo sito è nelle vicinanze della città di Karmoy, ed è un centro riservato per il test dei dispositivi che sfruttano il moto ondoso.

#### *Swedish Wave Power Project in Lysekil, Svezia*

### Capitolo 3 – Siti europei per testare i prototipi

Questo progetto mira a testare i prototipi WEC per verificarne le prestazioni e l'impatto ambientale. È possibile anche la connessione dei dispositivi alla rete elettrica. Il progetto terminerà nel 2013-2014, quando tutte le apparecchiature verranno rimosse.

#### *Testing the Kobold vertical axis tidal turbine at Strait of Messina, Italia*

È il luogo in cui si sta testando la turbina Kobold, nello stretto di Messina, tra l'Italia e la Sicilia. In questa area le correnti possono raggiungere la velocità di 2 m/s, ed è un sito adatto per l'installazione di turbine marine. È situata a 150 metri dalla costa dove l'acqua ha una profondità di circa 20 metri. Non sono stati testati altri tipi di dispositivi in questa zona.

#### *DanWEC test site in Hanstholm, Danimarca*

Sito al largo di Hanstholm, nel nord della Danimarca, dedicato alle prove da effettuare sui WEC. Il primo dispositivo è stato installato nel 2010.

#### *Wave Hub in Cornovaglia, Regno Unito*

Con una superficie di circa otto chilometri quadrati, è destinato al test di WEC. È collegato alla rete elettrica mediante una sottostazione ad Hayle. Le aziende interessate possono chiedere un'area di 1 km per 2km, che potranno utilizzare per cinque anni. Il centro effettua anche misurazioni sulle principali caratteristiche del moto ondoso.

## **3.2 – SITI FUTURI IN EUROPA**

#### *Biscay Marine Energy Platform (bimep), Spagna*

Questo sito è in fase di costruzione per testare futuri dispositivi del progetto PSE-MAR, il cui coordinatore è Tecnalia.

#### *The France Marine Experimentation Site for Wave Energy Conversionn (SEM-REV)*

Sarà situato 15 km al largo di Le Croisic, con una profondità dell'acqua di circa 5 m. Sarà possibile testare i prototipi WEC, e verificare l'impatto ambientale.



## **4 – PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA CORRENTI MARINE E DI MAREA**

L'energia associata alle correnti di marea è di tipo potenziale e cinetica. Si possono distinguere principalmente due tipi di impianti per la produzione di energia elettrica: impianti a barriera e impianti a turbine marine, che utilizzano rispettivamente l'energia potenziale e cinetica. Per energia potenziale si intende l'energia associata a una massa d'acqua ferma in un bacino, precedentemente accumulata. L'energia cinetica si riferisce invece all'energia associata al movimento dell'acqua.

### **4.1 – IMPIANTI A BARRIERA**

#### **4.1.1 – PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO**

Gli impianti a barriera fanno uso dell'energia potenziale delle maree. Un impianto di questo tipo è generalmente costituito da una diga, costruita lungo una baia o alla foce di un fiume in cui l'escursione della marea è superiore ai 5 metri. La produzione di energia elettrica da impianti di questo tipo è molto simile a quella di una centrale idroelettrica, solo che in questo caso il flusso dell'acqua è bidirezionale, mentre in una centrale idroelettrica la produzione di energia elettrica si ha soltanto per una direzione unica del flusso d'acqua. Un tipico impianto a barriera è costituito da turbine, argini, paratoie e canali per permettere il passaggio delle barche. Le turbine che vengono utilizzate in questi impianti possono essere unidirezionali oppure bidirezionali, in particolare si utilizzano turbine a bulbo e tubolari. Questi impianti a barriera possono essere divisi in due classi:

- sistemi a singolo bacino;
- sistemi a doppio bacino.

#### **Sistemi a singolo bacino**

Consiste in unico bacino e necessita di una barriera che attraversa la baia o la foce di un fiume. Ci sono tre metodi per produrre energia elettrica da sistemi a singolo bacino:

- Generazione con bassa marea: il bacino viene riempito d'acqua sfruttando l'alta marea, lasciando quindi aperte le paratoie. Quando la marea raggiunge la sua massima ampiezza, le paratoie vengono chiuse per intrappolare l'acqua all'interno del bacino. A questo punto è

possibile pompare acqua all'interno del bacino quando la domanda di energia è minore oppure quando l'energia elettrica è più economica (per esempio di notte). Le paratoie vengono tenute chiuse fino a quando la bassa marea non raggiunge un valore adeguato per lo sfruttamento del salto idrostatico. Successivamente l'acqua nel bacino viene lasciata fluire attraverso le turbine che accoppiate a dei generatori sono in grado di produrre energia elettrica, fino a quando il salto idrostatico non raggiunge il livello minimo, limite dato in funzione dell'efficienza operativa delle turbine.

- Generazione con alta marea: durante l'alta marea, le paratoie e le turbine rimangono chiuse fino al raggiungimento di un adeguato salto idrostatico tra l'esterno e l'interno del bacino. Quando viene raggiunto il livello idrostatico desiderato, l'acqua viene convogliata nelle turbine e fatta fluire quindi nel bacino, producendo così energia elettrica. La generazione di energia con questo metodo produce un maggiore impatto sull'ambiente e sulla navigazione in quanto, per aumentare al massimo il salto idrostatico, diminuisce il livello dell'acqua all'interno del bacino.
- Generazione a due vie: questo metodo permette di sfruttare sia la bassa che l'alta marea per produrre energia elettrica. Le paratoie vengono tenute chiuse fino a poco prima del raggiungimento del livello massimo di alta marea. Quindi l'acqua viene fatta fluire attraverso le turbine, generando elettricità, e in questo modo il bacino si riempie. Nel momento in cui viene raggiunto il livello minimo di salto idrostatico utile per la produzione di energia, le paratoie vengono riaperte. Quando il bacino è pieno d'acqua, e si verifica la bassa marea, la paratoie rimangono chiuse fino al raggiungimento di un salto idrostatico sufficiente. Una volta superato tale salto, l'acqua viene fatta fluire attraverso le turbine per produrre elettricità. Con questo sistema si ha il vantaggio di ridurre il periodo di non generazione dell'impianto e ridurre i costi di generazione, grazie al minor picco di potenza.

### **Sistemi a doppio bacino**

È un sistema caratterizzato dalla presenza di due bacini. Il bacino principale è molto simile a quello costruito nei sistemi a singolo bacino. La differenza tra questo sistema e quelli a singolo bacino è il fatto che una parte dell'elettricità prodotta nella fase di bassa marea, viene usata per pompare acqua nel secondo bacino, che viene così utilizzato come elemento di accumulazione; in questo modo il sistema può produrre energia elettrica in modo da seguire la domanda dei consumatori. Il maggior vantaggio di questi impianti è quello di poter produrre energia nei momenti di massima richiesta. Comunque è improbabile la fattibilità di questi sistemi a causa dell'inefficienza delle turbine nel funzionamento come pompe. Inoltre gli alti costi di costruzione di due bacini sono un ulteriore ostacolo allo sviluppo di questi sistemi.



#### 4.1.2 – STATO CORRENTE E SVILUPPI FUTURI

Le tecnologie per produrre elettricità con questi sistemi sono mature ed affidabili. Le uniche problematiche da attribuire a questi impianti sono gli alti costi di costruzione delle strutture necessarie e l'impatto ambientale. Esistono nel mondo soltanto sei impianti operativi, ma numerosi altri siti sono stati presi in considerazione per lo sfruttamento di questa risorsa.

Gli impianti attualmente operativi sono sei, riassunti nella tabella seguente.

<b>IMPIANTO</b>	<b>NAZIONE</b>	<b>POTENZA [MW]</b>	<b>TERMINE COSTRUZIONE</b>
<b>Rance Tidal Power Plant</b>	Francia	240	1966
<b>Kislaya Guba Tidal Power Station</b>	Russia	1.7	1968
<b>Jiangxia Tidal Power Station</b>	Cina	3.2	1980
<b>Annapolis Royal Generating Station</b>	Canada	20	1984
<b>Strabgford Lough SeaGen</b>	Regno Unito	1.2	2008
<b>Uldolmok Tidal Power Station</b>	Corea del Sud	1.5	2009
<b>Sihwa Lake Tidal Power Station</b>	Corea del Sud	254	2011

Due impianti sono invece in costruzione in Sud Corea:

- Incheon Tidal Power Station, che sarà completata nel 2015, e avrà una capacità compresa tra 818 e 1320 MW;

Gli impianti che sono attualmente in fase di studio sono:

IMPIANTO	NAZIONE	POTENZA [MW]	INIZIO COSTRUZIONE
Dalupiri Blue Energy Project	Filippine	2200	
Garorim Bay Tidal Power Station	Corea del Sud	520	
Gulf of Kutch Project	India	50	2012
Mezenskaya Tidal Power Plant	Russia	Da 8000 a 12000	
Penzhinskaya Tidal Power Plant	Russia	87100	
Severn Barrage	Regno Unito	8640	
Skerries Tidal Farm	Regno Unito	10,5	2011
Tugurskaya Tidal Power Plant	Russia	3640	

### 4.1.3 – IMPATTO AMBIETALE DEI SISTEMI A BARRIERA

Questo tipo di centrale per la produzione di energia elettrica causa un forte impatto ambientale, in quanto a modificare pesantemente l'habitat per le specie animali e vegetali, sia durante il periodo di costruzione che durante il periodo di normale funzionamento dell'impianto. A causa del forte impatto ambientale, si arriva alla scomparsa di molte specie di pesci e piante, andando così a modificare permanentemente l'ecosistema del luogo in cui viene costruita la diga. Proprio questi effetti negativi per l'ambiente sono i maggiori deterrenti per la costruzione di nuovi impianti di questo tipo. D'altra parte hanno il grande vantaggio di essere una tecnologia matura e il costo di produzione dell'energia è molto basso.

## 4.2 – LA RANCE TIDAL POWER PLANT

### 4.2.1 – CARATTERISTICHE GENERALI

Situata nei pressi di Saint-Malo nel nord-ovest della Francia, si trova alla foce del fiume Rance. È stata la prima centrale mareomotrice a entrare in funzione, ed è attualmente quella con la maggior potenza installata. Questo sito è particolarmente adatto per lo sfruttamento delle maree, che in questo luogo possono raggiungere una escursione massima di 13,5m, con una media di 8,2m.

## Capitolo 4 – Produzione di energia elettrica da correnti marine e di marea

Lo studio per la fattibilità del progetto è stato effettuato negli anni che vanno dal 1943 al 1961. La costruzione di tutto l'impianto ha richiesto cinque anni: è iniziata nel 1961 e terminata nel 1966. È una centrale a singolo bacino la cui area ricopre una superficie di circa 22 km<sup>2</sup>, con una capacità d'acqua di 184 milioni di metri cubi.

La struttura è composta da una diga della lunghezza di circa 750 metri, che possiamo dividere in diversi settori:

- Un canale per consentire il passaggio delle navi (ship lock);
- Paratoie (barrage);
- Una zona centrale in cui sono situate le turbine e la sala comandi (power plant);
- Una parte con la sola funzione di diga (dike);

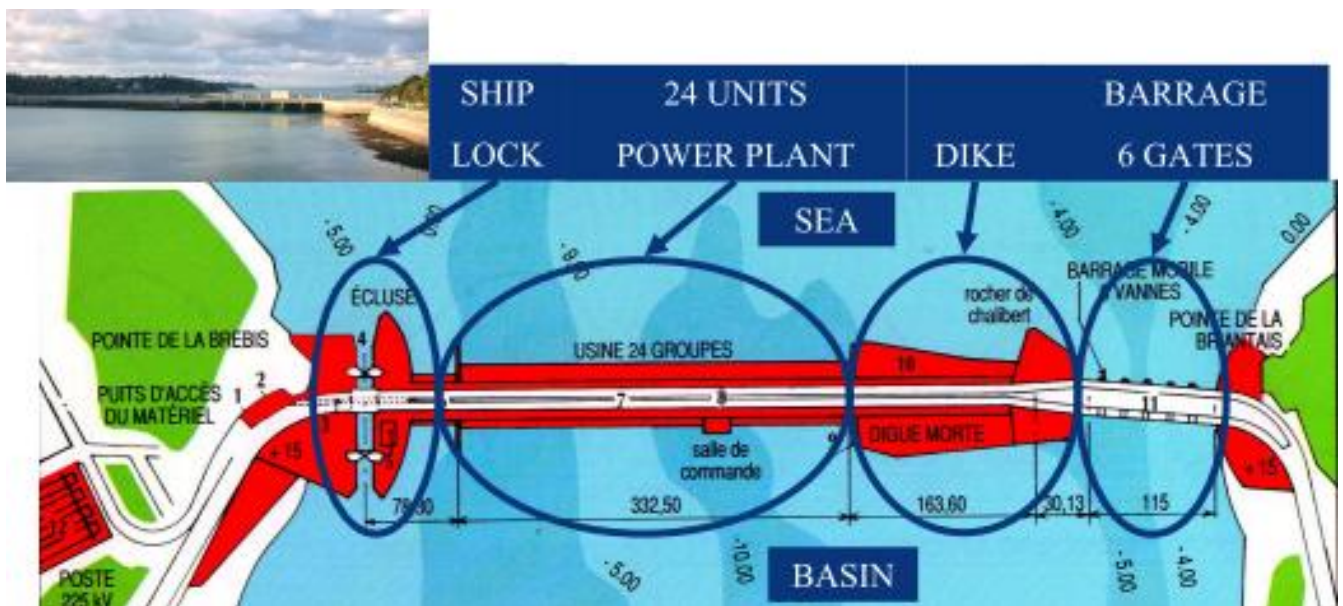
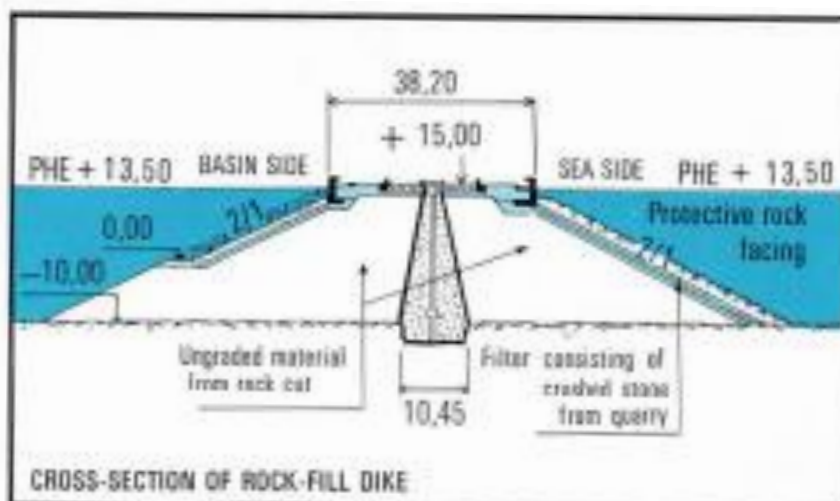
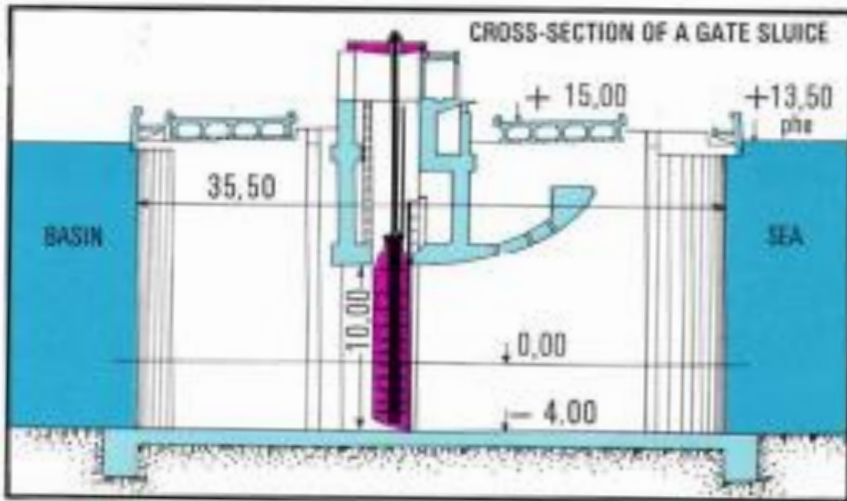


Figura 4 - Piantina della diga a La Rance

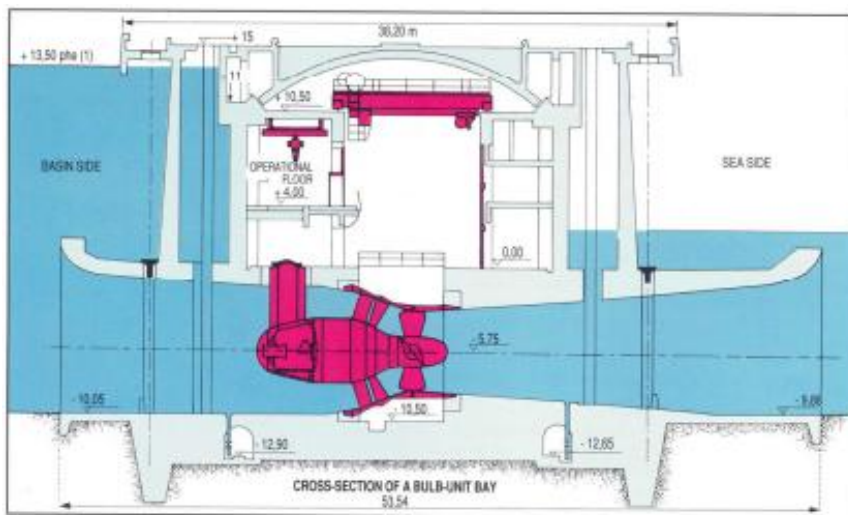
Le viste in sezione delle parti della diga sono visibili nelle seguenti immagini.



Vista in sezione della parte con la sola funzione di diga, lunghezza pari a 163,6 m.



Vista in sezione di una paratoia. In totale sei paratoie di altezza 10 m e larghezza 15 m. La lunghezza di tutta la sezione dedicata alle paratoie è pari a 115 m.

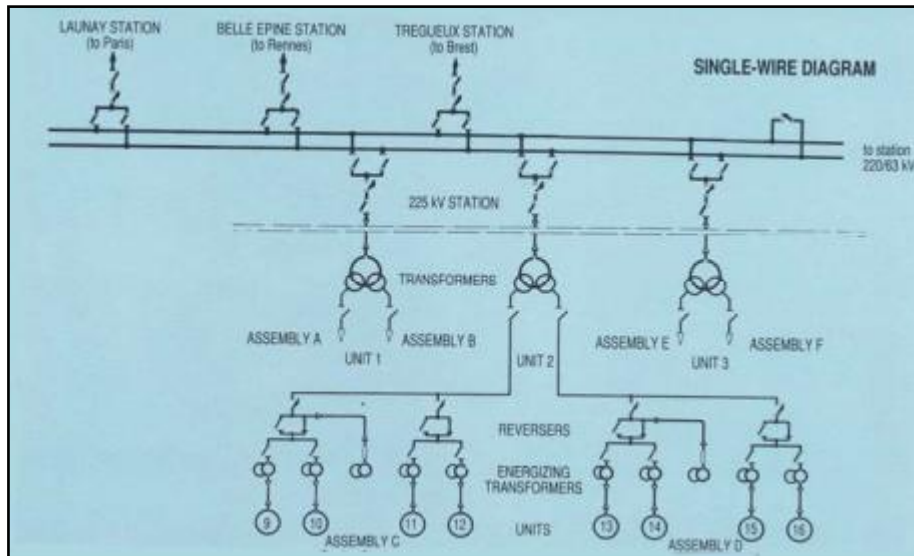


Vista in sezione di una turbina a bulbo. In totale 24 turbine. Lunghezza totale della sezione, 332,5 m.

#### 4.2.2 – IMPIANTO ELETTRICO

Come già accennato, la centrale è composta da 24 turbine, in cui l'alternatore è integrato nel bulbo. In totale quindi sono presenti 24 alternatori, uno per ogni turbina, ciascuno della potenza di 24 MVA, e operano in aria ad una pressione inferiore ai 2 bar (pressione assoluta). La tensione di uscita è pari a 3,5 kV. Gli alternatori vengono divisi in tre gruppi da otto, e collegati ad un trasformatore a tre avvolgimenti, con tensioni nominali 3,5/3,5/225 kV. In totale quindi sono presenti tre trasformatori come il precedente, di potenza pari a 80 MVA, raffreddati ad olio a circolazione naturale e aria a circolazione forzata (ONAF). Questi trasformatori sono poi connessi alla rete a 225 kV con cavi in olio in pressione.

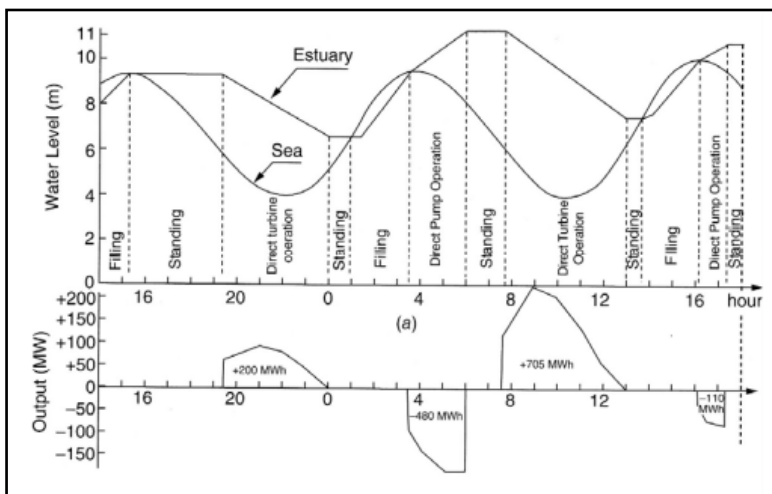
Di seguito uno schema unifilare semplificato dell'impianto elettrico.



#### 4.2.3 – MODALITÀ DI GENERAZIONE DI ENERGIA

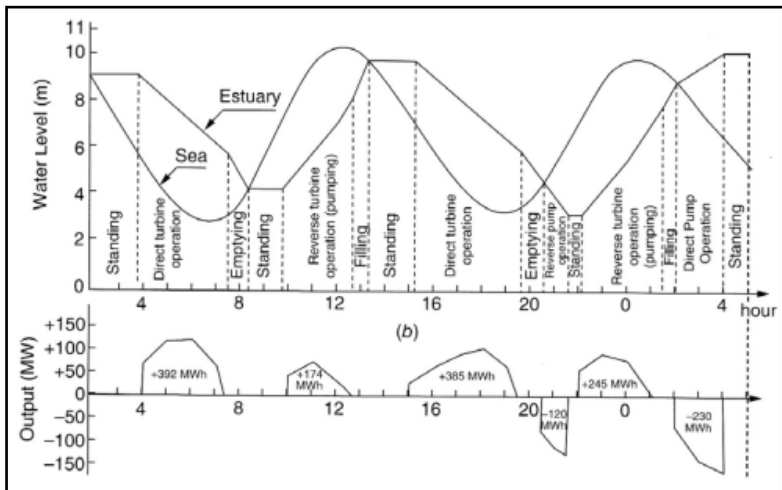
Per la centrale di La Rance è stato scelto di generare energia sfruttando sia l'alta marea che la bassa marea, in quanto il bilancio totale netto di energia prodotta è superiore rispetto al solo utilizzo della bassa marea.

Con l'aiuto dei grafici seguenti, possiamo calcolare il bilancio netto di energia (cioè considerando anche l'energia necessaria per il pompaggio dell'acqua).



#### BILANCIO DI ENERGIA SFRUTTANDO SOLO LA BASSA MAREA

Con un facile calcolo si ricava che il bilancio di energia è pari a 315 MWh.



**BILANCIO DI ENERGIA  
SFRUTTANDO SIA L'ALTA CHE  
LA BASSA MAREA**

In questo caso il bilancio di energia è superiore al doppio rispetto al precedente, e assume un valore pari a 846 MWh.

È evidente quindi il vantaggio che deriva dallo sfruttamento di entrambe le maree.

I termini inglesi nella figura hanno il seguente significato:

**standing** – attesa che si raggiunga un livello di salto idrostatico sufficiente

**direct turbine operation** – azione diretta delle turbine (acqua fluisce dal bacino al mare attraverso le turbine)

**emptying** – svuotamento del bacino

**reverse turbine operation** – azione inversa delle turbine (acqua fluisce dal mare al bacino)

**filling** – riempimento del bacino

**reverse pump operation** – le turbine pompano acqua dal bacino al mare

**direct pump operation** – le turbine pompano acqua dal mare al bacino

Il salto idrostatico minimo per queste turbine è pari a 3m. Questo vuol dire che, per far entrare in funzione le turbine, la differenza tra il livello del mare e del bacino deve essere di almeno 3m.

Quando questa differenza ha un valore inferiore, le turbine non producono più energia. Come si vede anche dal grafico, maggiore è la differenza di livello, maggiore è la potenza disponibile in uscita.

Nella media, con riferimento alla sola energia prodotta, cioè senza considerare quella necessaria al pompaggio, si ha che:

- L'energia prodotta durante la bassa marea corrisponde al 60% del totale
- L'energia prodotta durante l'alta marea varia dal 2 al 6%
- L'energia necessaria al pompaggio varia dal 15 al 20% della totale energia prodotta

#### **4.2.4 – COSTO DELL'ENERGIA**

Il totale costo dell'impianto è stato di 620 milioni di franchi (circa 94,5 milioni di euro), che oggi corrisponderebbero a 580 milioni di euro. Vista la lunga durata di vita dell'impianto, la maggior parte dei costi del progetto è stata coperta, e il costo dell'energia è inferiore ai 2 c€/kWh.

Mediamente in un anno la centrale genera 540 milioni di kWh.

#### **4.2.5 – PROBLEMATICHE GENERALI**

Uno dei problemi più significativi per questo impianto è rappresentato dal fatto che le turbine sono immerse in un liquido elettrolitico, che favorisce la corrosione dei materiali metallici. Per salvaguardare i materiali metallici da questo dannoso effetto, viene utilizzata la tecnica della protezione catodica.

Dopo diversi studi, prove di laboratorio ed evidenze pratiche, si è deciso di proteggere dalla corrosione tutte le 24 turbine, le paratoie e le parti metalliche del canale per le navi. Questo sistema di protezione richiede un costante controllo, che in termini temporali equivale a 874 ore all'anno.

#### **4.2.6 – IMPATTO AMBIENTALE**

Per quanto riguarda l'ambiente acquatico, il maggior impatto si è avuto durante la fase di costruzione della diga. Durante questo periodo infatti si è visto la scomparsa della fauna e della flora marina, e un maggior accumulo di sedimenti e materiale organico nel bacino.

Ma già nel 1976, viene raggiunto un nuovo equilibrio biologico e quindi una rinascita dell'ambiente acquatico del bacino.

#### **4.2.7 – INTEGRAZIONE DELLA STRUTTURA**

Sforzi sono stati fatti nel miglioramento della qualità dell'acqua e nella navigabilità. Nella parte superiore della diga è stata costruita una strada che ha permesso un collegamento più breve tra Dinard e Saint-Malo.

La diga è anche un'attrazione turistica che attrae circa 70000 visitatori all'anno.



## 4.3 – TURBINE MARINE

### 4.3.1 – PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Le turbine marine estraggono l'energia cinetica delle correnti generate dal movimento dell'acqua per trasformarla in energia elettrica. Questa tecnologia è simile a quella delle turbine eoliche, anche se ci sono molte differenze sulle condizioni operative. L'acqua è infatti 832 volte più densa dell'aria e la velocità delle correnti marine è generalmente molto inferiore a quella del vento. La pratica ha mostrato che le turbine marine sopportano maggiori sollecitazioni rispetto alle turbine eoliche. Devono essere in grado di operare durante i flussi di alta e bassa marea, e resistere alle sollecitazioni strutturali che si presentano quando non generano elettricità.

Le turbine più utilizzate per l'estrazione dell'energia delle correnti sono le seguenti:

- Turbine marine ad asse orizzontale: le pale delle turbine ruotano attorno a un asse orizzontale parallelo alla direzione del flusso d'acqua;
- Turbine marine ad asse verticale: le pale delle turbine ruotano attorno a un asse verticale perpendicolare alla direzione del flusso d'acqua.

Nella sua forma più semplice una turbina marina è composta da un certo numero di pale montate sul mozzo (rotore), un moltiplicatore di giri e il generatore. L'effetto idrodinamico del flusso d'acqua sulle pale, comporta la rotazione del rotore connesso al moltiplicatore di giri, che converte la velocità di rotazione del rotore in una velocità adatta per il generatore che così produce energia elettrica. L'elettricità generata viene trasmessa a terra con dei cavi.

Queste tre parti sono montate su una struttura di supporto necessaria per resistere alle difficili condizioni dell'ambiente marino. Ci sono principalmente tre tipi di strutture di supporto. La prima è conosciuta come struttura a gravità, e consiste in una grande massa di acciaio e calcestruzzo collegata alla base della struttura per ottenere una buona stabilità. La seconda opzione consiste in una struttura ancorata al suolo marino attraverso travi di acciaio o calcestruzzo. La terza struttura viene chiamata struttura flottante ed è collegata al fondo marino attraverso cavi o catene.

### 4.3.2 – STATO CORRENTE

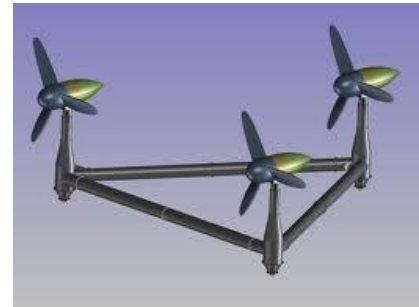
Le tecnologie delle turbine marine sono per la maggior parte in fase di studio, alcune in fase pre commerciale. Attualmente gli studi sono incentrati sull'affidabilità di questa tecnologia. Recenti sviluppi hanno portato alla creazione di prototipi in scala ridotta e in scala completa, che gli sviluppatori hanno l'opportunità di testare in uno dei centri precedentemente descritti



Di seguito vengono descritti i prototipi attualmente più sviluppati, tra cui alcuni non convenzionali, che sono comunque considerati turbine marine.

*DeltaStream Turbine – Tidal Energy Ltd. – Regno Unito*

È una struttura triangolare, con le turbine posizionate ai vertici del triangolo. Grazie al baricentro basso, la struttura non necessita di ancoraggi e può essere semplicemente appoggiata sul fondale marino. Le turbine sono dotate di tre pale, con un diametro di 15 metri. La totale potenza delle tre turbine è di 1,2MW. Possono ruotare in modo da seguire la direzione dei flussi di marea.



Con la loro rotazione, le turbine azionano un generatore. L'energia prodotta viene trasferita a terra mediante cavi marini fino alla stazione di conversione situata a terra.

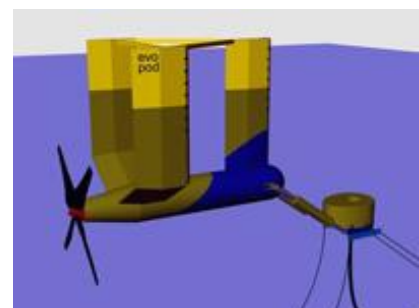
Nel 2009 è stato testato un prototipo in scala alla Cranfield University che ha permesso di verificare le prestazioni del dispositivo, permettendo così l'inizio della costruzione del prototipo in scala completa.

Per questo dispositivo è stata eseguita la valutazione dell'impatto ambientale (Environmental Impact Assessment, EIA), ottenendo così nel marzo 2011 la licenza da parte del governo gallese (Welsh Government, WS) e del dipartimento per l'energia e cambiamenti climatici (Department for Energy and Climate Change, DECC).

Grazie a fondi europei, nel 2012 sarà costruito e messo in funzione un prototipo su scala completa della potenza di 1,2MW, situato nello stretto di Ramsey, tra il Galles e l'isola di Ramsey. Il prototipo sarà testato e allacciato alle rete per dodici mesi, per poi essere rimosso. Il risultato del test influirà molto sugli sviluppi futuri di questa tecnologia (produzione e diffusione).

*Evopod Tidal Turbine – Ocean Flow Energy Ltd. – Regno Unito*

Consiste in una struttura galleggiante semisommersa ancorata al suolo marino, dotata di una turbina ad asse orizzontale, in grado di ruotare a seconda della direzione della corrente. Il primo modello in scala 1 a 40 è stato testato all'università di Newcastle e ha provato l'efficienza della turbina e la stabilità del sistema di ancoraggio.



Dal giugno 2008 e nel 2009 è stato testato un modello in scala 1 a 10 nello stretto di Strangford (Irlanda del Nord), e nel marzo 2011 ha dimostrato la possibilità di essere collegato alla rete elettrica. Il prossimo passo è quello di testare il prototipo in scala 1 a 4, della potenza di 35 kW, con l'intenzione di collegarlo alla rete. Questo aiuterà a comprendere le prestazioni che si potranno ottenere da unità più grandi.

*Free Flow Turbines – Verdant Power Ltd. – Canada e Stati Uniti*

È una turbina ad asse orizzontale, costituita da tre pale del diametro di circa cinque metri. La struttura viene posata sul suolo marino, è completamente sommersa e non richiede la costruzione di dighe o altre opere. Può essere usata per sfruttare le correnti delle maree e dei fiumi. Inoltre non influisce sulla direzione naturale della corrente.



Sono attualmente operativi due progetti: il primo nell'East River a New York (RITE Project), il secondo nel fiume Saint Lawrence (CORE Project) in Cornwall, Ontario. Nel primo caso sono state concluse due fasi, quella di test del prototipo e prova della turbina in scala completa; in fase di approvazione l'installazione di trenta turbine da 1MW destinate alla produzione e alla vendita di energia elettrica.

Nel secondo caso sono state completate le fasi di test e dimostrazione di due turbine pre-commerciali, dal 2007 al 2011, mentre la prossima fase, cioè l'installazione di turbine commerciali con potenza fino a 5MW, sarà completata negli anni compresi tra il 2011 e il 2013 (con erogazione di energia alla rete locale).

*Lunar Energy Tidal Turbine – Lunar Energy Ltd. – Regno Unito*

È una turbina ad asse orizzontale. La struttura di sostegno è a gravità, e comprende una turbina bidirezionale da 1MW, del diametro di 11,5m. Il flusso d'acqua viene inviato alla turbina per mezzo di un condotto (studiato per massimizzare l'estrazione di energia) della lunghezza di 19,2m e diametro 15m.



Attualmente il progetto è in fase di test e sviluppo della turbina.

Il progetto più importante in fase di studio è la costruzione di un parco di 300 turbine in Corea del Sud (Wando Hoenggan Water Way) in collaborazione con Korean Midland Power, che dovrebbe essere operativo entro la fine del 2015. Altri progetti minori sono in corso in collaborazione con EoN.

*Turbine serie AR, AS, AN – Atlantis Resource Corporation Ltd - Singapore*

La turbine serie AR è ad asse orizzontale, costituita da tre pale fisse e due rotori montati sullo stesso asse del diametro di 18 metri. È stata progettata per operare in oceano aperto nelle peggiori condizioni ambientali. La potenza sviluppata è di 1MW con corrente alla velocità di 2.6m/s. Questa turbina si sta



**Turbina AR**

testando all'EMEC in questi mesi.

La turbina AS è ad asse orizzontale, costituita da tre pale e un condotto. È adatta ad operare in siti con correnti unidirezionali o bidirezionali. Le potenze disponibili sono da 100kW, 500kW e 1MW, riferite alla velocità della corrente di 2.6m/s. È riconosciuta come la turbina più efficiente al mondo. È stata testata a Singapore nel 2008 e all'inizio del 2009 in Australia.



**Turbina AS**

La turbina AN è adatta ad operare nelle acque superficiali, ed è stata testata e connessa alla rete con eccellenti risultati in Australia. Sfrutta il momento della corrente sulle pale per guidare una catena perpendicolare al flusso d'acqua. Può operare in acqua con alto contenuto di detriti. Questa turbina è stata testata e collegata alla rete a San Remo in Australia nel 2006.



**Turbina AN**

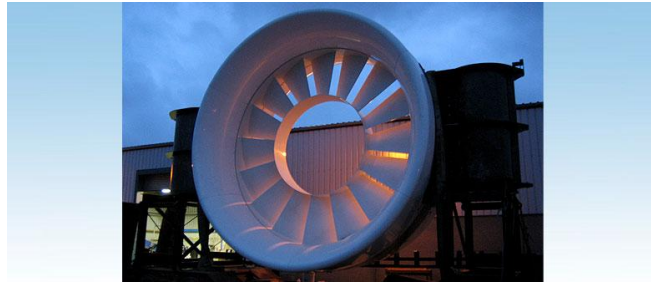
Un impianto della potenza iniziale di 50MW, con l'impiego di turbine AK-1000, dovrebbe essere costruito a Gujarat (uno stato dell'India). Si prevede che la potenza totale dell'impianto possa essere successivamente aumentata.

È in fase di studio un impianto nel Pentland Firth (nel nord della Scozia) con l'uso di turbine AK-1000 e TGL-1MW, con l'obiettivo di raggiungere la totale potenza di 398 MW. Non è stata ancora definita una data di messa in funzione dell'impianto.

*Open Centre Turbine – Open Hydro Ltd. – Irlanda **EDF***

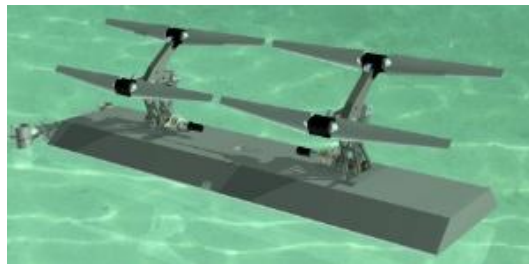
Consiste in un rotore a lenta rotazione di diametro pari a sei metri, uno statore, un condotto e un generatore. La Open-Hydro è stata la prima compagnia a connettere una turbina marina alla rete elettrica del Regno Unito. Turbina di 250 kW installata all'EMEC. Nel 2008 questa azienda è stata scelta da EDF per lo sviluppo di un impianto dimostrativo in Francia nella regione della Britannia (zona Paimpol-Bréhat), con installazione della prima turbina prevista entro la fine del 2011.

Seguirà l'installazione di altre tre turbine (entro la fine del 2012) che saranno connesse alla rete elettrica francese. Sono in fase di studio anche impianti nell'isola di Alderney (nel canale della Manica) e in Nova Scotia in Canada.



*Pulse Tidal Hydrofoil – Pulse Generation Ltd. – Regno Unito*

È adatta a operare in acque superficiali e costituita da pale oscillanti. Un prototipo della potenza di 100kW che produce elettricità dal maggio del 2009, è situato alla foce del fiume Humber nel nord del Regno Unito. Il prossimo test è previsto per il 2012 nell'isola di Skye, con l'installazione iniziale di una turbina da 1,2MW, fino ad arrivare a un massimo di 9,6MW (collegando otto turbine).



*SeaGen – Marine Current Turbines Ltd. – Regno Unito*

Turbina da 1,2MW. Nel 2008 un modello di prova è stato installato e connesso alla rete nel Strangford Lough (Irlanda del Nord), ed è attualmente operativo. Consiste in due rotori ad asse orizzontale del diametro di 16 metri. Il rotore è connesso a un moltiplicatore di giri e infine al generatore. Le pale dei rotori sono orientabili e quindi si possono adattare a seconda della direzione della corrente, ma possono essere utili anche per rallentare la velocità di rotazione qualora fosse necessario un intervento per la manutenzione.

Sono in fase di studio due impianti: uno a Kyle Rhea (Scozia) dove si è proposto di installare 4 generatori per una potenza fino a 8MW, il secondo in Galles dove si prevede di installare nove generatori con una potenza totale fino a 10 MW. Entrambi gli impianti sono in attesa dei permessi per iniziare la costruzione, che si prevede inizierà nel corso del 2012.



*Stingray Tidal Energy Converter – Engineering Business Ltd. – Regno Unito*

Trasforma l'energia cinetica del movimento dell'acqua in potenza idraulica. È composto da un braccio oscillante alle cui estremità sono presenti due pale. Un prototipo di 150kW è stato testato nel 2002, ma lo sviluppo si è interrotto per difficoltà economiche.



*Tidal Fence Davis Hydro Turbine – Blue Energy Ltd. - Canada*

Consiste in una serie di turbine ad asse verticale, composte da quattro pale fisse collegate al rotore, che attraverso un moltiplicatore di giri fa ruotare il generatore. Questo sistema offre la possibilità di estrarre energia in qualsiasi sito. Nei fiumi può assumere una potenza compresa tra 5kW e 500kW, mentre negli oceani le potenze variano da 200MW a 8000MW. Un prototipo è in funzione in Canada.





*TideI Stream Generator – SMD Hydrovision Ltd. – Regno Unito*

Consiste in due turbine controrotanti, ognuna della potenza di 500kW, con diametro pari a 15m. È stato testato con successo un modello in scala 1 a 10 al National and Renewable Energy Centre (NaREC) a Blyth, nel Regno Unito. È un sistema galleggiante vincolato al suolo marino con delle catene. La struttura è in grado di seguire la direzione della corrente marina.



*Tidal Stream Turbine – Hammerfest Strom AS – Norvegia*

È una turbina a tre pale ad asse orizzontale, dotata di un moltiplicatore di giri e di un generatore. La struttura di sostegno è a gravità. Nel 2003 è stata installata una turbina da 300kW nella costa nord della Norvegia che ha provato l'affidabilità e l'efficienza della turbina. Un'altra turbina pre-commerciale da 1MW è stata testata all'EMEC nel 2011 e sarà utile per i futuri sviluppi della turbina. È in fase di studio la realizzazione di due impianti in Scozia, rispettivamente della potenza di 10MW ad Islay e 95MW a Duncansby. Si prevede che nel primo caso l'installazione delle turbine avrà inizio nel 2013, mentre nel secondo caso si dovrà attendere fino al 2015.



*Turbina Marina Kobold – Ponte di Archimede Spa – Italia*

È una turbina marina sommersa ad asse verticale. Le dimensioni dell'impianto in prova a Ganzirri (Stretto di Messina) sono di un diametro di 10 m. La turbina sottostante alla struttura ha invece un diametro di 6 m con un totale di 3 pale, alla quale è accoppiato un moltiplicatore di giri e un generatore. Questo impianto è in funzione dal 2002 con lo scopo di studiare le prestazioni. È in costruzione un altro prototipo dalle dimensioni maggiori, che sarà installato vicino all'isola di Lomboc, dove potrebbe fornire energia ad un piccolo villaggio. Hanno espresso interesse verso questa tecnologia l'Indonesia, la Cina e le Filippine. È stata creata infatti una joint-venture tra Ponte di Archimede e l'Indonesian Walinusa Energy Corporation. Il progetto ha trovato appoggio anche da parte dell'UNIDO (United Nations Industrial Development Organization).



#### **4.3.3 – SVILUPPI FUTURI**

Come visto precedentemente, molte sono le tecnologie in fase di studio per ricavare energia dalle correnti marine e di marea. Le compagnie che si occupano dello sviluppo di questo settore hanno testato sia prototipi su scala completa che in scala ridotta, generalmente con risultati soddisfacenti. Se i test continueranno ad essere così positivi, è credibile che nei prossimi dieci anni avverrà la

costruzione dei primi parchi di produzione di energia elettrica. Ovviamente solo alcuni dei dispositivi precedentemente descritti saranno utilizzati per la produzione di energia elettrica, cioè quelli che consentiranno di produrre energia a prezzi competitivi, almeno in confronto con le altre fonti rinnovabili. La maggior parte delle tecnologie opera con turbine ad asse orizzontale, il che suggerisce che molto probabilmente questa sarà la configurazione ottimale per una turbina marina. Con il livello di crescita attuale, si prevede inoltre che risulteranno sfruttabili anche siti che precedentemente venivano considerati non economicamente convenienti.

I vantaggi che potrebbero arrivare dallo sfruttamento di questa fonte di energia altamente prevedibile sono molteplici. Dal punto di vista dell'approvvigionamento dell'energia, sarebbe possibile fornire elettricità alle comunità che attualmente ne sono prive, come per esempio isole o arcipelaghi, e nei paesi più industrializzati ci sarebbe una maggiore diversificazione delle fonti di energia. Queste tecnologie inoltre richiederebbero nuovi posti di lavoro, dando così anche un impulso alla crescita economica locale. Altro vantaggio importante arriva dal basso impatto ambientale e le ridotte emissioni di CO<sub>2</sub> (considerando l'intero ciclo di vita, costruzione e smantellamento a fine vita).



## **5 – PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA MOTO ONDOSI**

### **5.1 – FENOMENI SFRUTTABILI**

L'energia potenziale e cinetica del moto ondoso viene trasformata in energia elettrica mediante dispositivi che possono essere così suddivisi:

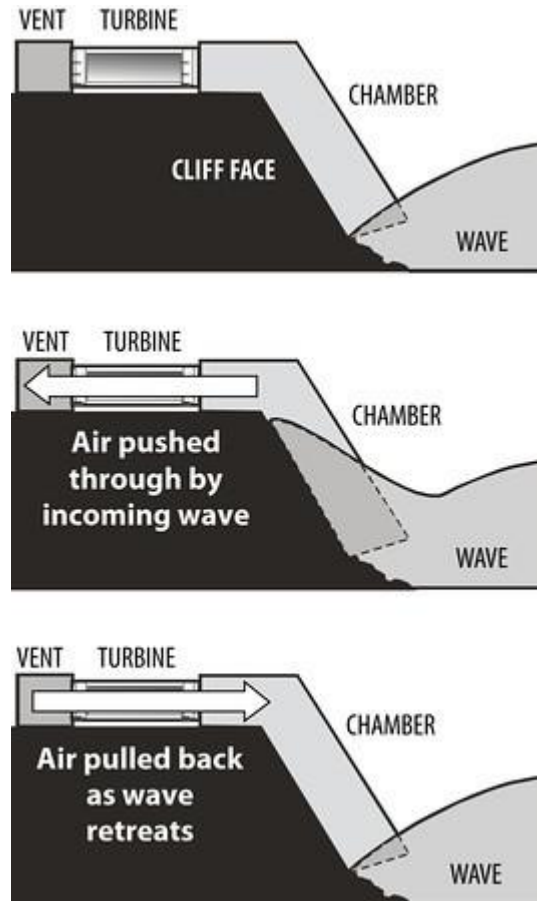
- dispositivi che sfruttano il principio della colonna d'acqua oscillante;
- dispositivi con apparati galleggianti;
- sistemi con impianti sommersi;
- sistemi di superficie con bacino di raccolta.

#### **5.1.1 – COLONNA D'ACQUA OSCILLANTE**

Questo principio deriva dal fatto che il moto ondoso provoca un continuo alzarsi e abbassarsi del livello dell'acqua. Per sfruttare questo fenomeno si costruisce una camera in cui l'acqua aumenta e diminuisce il suo livello grazie all'azione esterna delle onde. Quando il livello dell'acqua all'interno della camera sale, l'aria al suo interno viene spostata e tenderà ad uscire dalla camera se in questa è presente un'uscita; accade l'inverso quando il livello dell'acqua diminuisce, cioè l'aria viene risucchiata nella camera. Si può sfruttare questo movimento d'aria per generare energia elettrica con l'uso di una turbina attraverso la quale l'aria può entrare e uscire, e cedere la sua energia. In questo caso si dovrà utilizzare una turbina che ruota sempre nello stesso verso indipendentemente dalla direzione del flusso d'aria: una turbina adatta per questo scopo è la turbina Wells.

Le tecnologie per sfruttare questo principio possono essere implementate nei pressi della costa oppure anche al largo.

Di seguito una rappresentazione schematica di come opera una camera a colonna d'acqua oscillante.



### 5.1.2 – DISPOSITIVI CON APPARATI GALLEGGIANTI

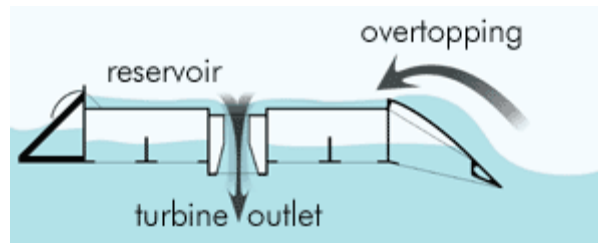
Questi dispositivi sfruttano l'ampiezza dell'onda, cioè la differenza tra l'altezza massima e minima dell'onda. Possono essere sia galleggianti che parzialmente galleggianti. Questi dispositivi oscillano grazie al movimento delle onde, e per catturare l'energia vengono accoppiati a dei pistoni idraulici, a loro volta opportunamente collegati a dei generatori. È possibile sfruttare questa energia sia nei pressi della costa che in mare aperto a seconda della tecnologia adottata.

### 5.1.3 – SISTEMI CON IMPIANTI SOMMERSI

Sono dispositivi completamente sommersi che sfruttano il principio di Archimede. Utilizzando delle camere sommerse, grazie alla variazione della colonna d'acqua dovuta al passaggio delle onde, si ha un movimento verticale della struttura. Grazie a questo movimento è possibile produrre energia elettrica con opportuni generatori lineari.

### 5.1.4 – SISTEMI DI SUPERFICIE CON BACINO DI RACCOLTA

Questi sistemi sfruttano l'energia delle onde per accumulare acqua in un bacino, che successivamente viene fatta fluire attraverso una o più turbine per produrre energia elettrica. Uno schema generale del funzionamento dell'impianto si può vedere nell'immagine seguente.



### 5.2 – STATO CORRENTE

Anche in questo caso le tecnologie per lo sfruttamento del moto ondoso sono in fase di sviluppo, alcune sono anche state realizzate in scala completa, ma necessitano ancora di essere migliorate. Molti impianti sono in fase di studio o di realizzazione. Anche le società che sviluppano queste tecnologie hanno la possibilità di testare e verificare le prestazioni dei loro prototipi nei vari siti precedentemente descritti. Per il completo sviluppo delle tecnologie sono necessari investimenti da parte delle società e fondi per la ricerca da parte degli enti governativi.

### 5.3 – DISPOSITIVI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA MOTO ONDOSO

Di seguito sono presentate le tecnologie più avanzate per la produzione di energia elettrica da moto ondoso, divise in base al principio che sfruttano per catturare l'energia presente nelle onde.

*Aegir Dynamo – Ocean Navitas – Regno Unito*

È un WEC di tipo galleggiante. Costituito da una parte fissa e una mobile: la parte fissa è completamente sommersa ed ancorata al suolo marino e ospita al suo interno il generatore a magneti permanenti e il sistema di conversione dell'energia elettrica; la parte mobile ha invece la funzione di sfruttare la variazione del livello



## Capitolo 5 – Produzione di energia elettrica da moto ondoso

dell'acqua causato dalle onde. Quando il livello aumenta, la parte mobile viene spinta verso l'alto, quando invece diminuisce, la parte mobile scende verso il basso per effetto della gravità.

Attraverso un sistema meccanico, questo moto viene trasferito al generatore, che è così in grado di generare energia elettrica. Il dispositivo è modulare: può operare in singole unità oppure essere utilizzato insieme ad altri. Sono in progetto test all'EMEC e al Wave Hub. La potenza di ogni unità sarà di 1,2 MW.

### *Archimedes Wave Swing – Regno Unito*

È un sistema composto da un insieme membrane flessibili collegate fra loro che convertono l'energia del moto ondoso in energia pneumatica (aria compressa). In uscita è presente un sistema di generazione che converte l'energia pneumatica in energia elettrica. ogni dispositivo sarà costituito da 12 membrane della grandezza di 16 m x 8 m, posizionate attorno a una struttura circolare del diametro di circa 60 m. La potenza che sarà in grado di produrre sarà di circa 2,5 MW. La collocazione ottimale per questo dispositivo sarà in acque profonde circa 100 m, ancorato al suolo marino. Anche questo sistema può essere utilizzato per formare parchi di generazione.



### *DEXA Wave energy Cockerell's Raft – Danimarca*

È composto da due ponti galleggianti in grado di oscillare indipendentemente, collegati mediante pistoni idraulici. Quando un'onda attraversa il dispositivo, i due ponti seguono la variazione del livello dell'acqua, e muovendosi agiscono sui pistoni idraulici che comprimono in fluido in grado di far girare un motore. Un modello è già stato testato nel 2009 per un periodo di dieci mesi. Un modello in scala 1 a 4 della potenza di 20 kW si sta testando nel DanWEC.



*Langlee Wave Power – Norvegia*

È un dispositivo quasi completamente sommerso ancorato al suolo marino. Sfrutta il movimento orizzontale del moto ondoso grazie a dei pannelli che vengono mossi dalle onde. Si viene a creare un moto alternativo che mediante un sistema idraulico fa girare un generatore. È stato testato con successo alla Aalborg University in Danimarca. Attualmente l'azienda è impegnata nella costruzione di un parco dimostrativo in Turchia, che sarà realizzato a partire dal 2012. Se la prova del dispositivo avrà esito positivo, è previsto che nell'area di installazione si avrà una potenza installata di 28 MW.



*LIMPET – Voith Hydro – Regno Unito*

Sfrutta il principio della colonna d'acqua oscillante e utilizza una turbina Wells. Dal 2000 è operativo e connesso alla rete un impianto in scala commerciale, della potenza di 500 kW. Nel luglio 2011 è stato inaugurato un secondo impianto a Mutriku, in Spagna, composto da 16 turbine wells. La potenza dell'impianto è pari a 300 kW. È stato costruito per l'EVE (Ente Vasco de la Energia).



*Ocean Treader WEC – Green Ocean Energy Ltd. – Regno Unito*

È una struttura ancorata al suolo marino, composta da una parte centrale con la funzione di sostenere due galleggianti, che grazie al moto ondoso compiono movimenti verticali alternativi. Accoppiando a questi galleggianti un sistema idraulico, è possibile far ruotare un motore che a sua volta aziona un alternatore. Questo dispositivo può essere anche utilizzato come base per l'installazione di turbine eoliche off-shore. Per questa tecnologia sono state eseguite solo prove in laboratorio su prototipi in scala ridotta.



*OE Buoy – Ocean Energy – Irlanda*

È un dispositivo galleggiante ancorato al suolo marino che sfrutta il principio della colonna d'acqua oscillante. La variazione del livello dell'acqua nella camera fa fluire l'aria attraverso la turbina, che girando aziona il generatore elettrico. La struttura è stata studiata in modo da resistere anche alle peggiori condizioni meteorologiche. Numerosi prototipi in scala ridotta sono stati testati in laboratorio. Attualmente un prototipo in scala 1 a 4 è installato nella costa ovest dell'Irlanda.



*Oyster – Aquamarine Power – Regno Unito*

È un sistema studiato per acque profonde circa 15 m. È costituito da una parte fissata al suolo marino, e un'altra galleggiante incernierata alla parte fissa, che costituisce un ostacolo al passaggio delle onde. Questa parte mobile si muove con moto rotatorio rispetto al punto in cui è collegata alla parte fissa. Con il suo movimento agisce su un sistema idraulico che spinge acqua ad alta pressione sulla costa, dove è situata una turbina simile a quella delle centrali idroelettriche. Nel 2009 è stato testato il primo prototipo in scala completa, che ha dimostrato la fattibilità di questa tecnologia (ha raggiunto le 6000 ore di funzionamento).



Nell'anno corrente è stato installato un Oyster a Billia Croo vicino ad Orkney. L'obiettivo è quello di installare altri dispositivi analoghi nello stesso sito per dimostrare la possibilità di sfruttare questa tecnologia per formare dei parchi di produzione.

*Pelamis – Pelamis Wave Power Ltd. – Scozia*

È uno dei WEC più evoluti. Costituito da diverse parti cilindriche in modo da potersi muovere indipendentemente tra di loro. Sotto l'effetto del moto ondoso, le diverse parti oscillano, e grazie a un sistema di pistoni idraulici situati nei punti di collegamento delle sezioni, un fluido ad alta pressione viene accumulato, acconsentendo una produzione continua dell'energia elettrica. Attualmente si sta testando un prototipo da 750 kW all'EMEC, in collaborazione con E.ON. A breve è invece previsto la prova sempre





## Capitolo 5 – Produzione di energia elettrica da moto ondoso

all'EMEC di un altro prototipo in costruzione della stessa potenza, ma in collaborazione con la ScottishPower Renewables. In funzione dei risultati ottenuti da questi test, è prevista la costruzione di un parco di produzione, inizialmente di 20 MW, ma con lo scopo di essere ampliato, al largo di Agucadoura. Questo progetto è in collaborazione con EDP (Energias de Portugal) ed Efacec (azienda che opera anche nel settore dell'energia).

### *PICO – Wave Energy Centre – Portogallo*

Completato nel 1999, sfrutta il principio della colonna d'acqua oscillante. Ha una potenza di 400 kW ed è situato nell'isola di Pico nelle isole Azzorre. È utilizzato prevalentemente per studi riguardanti questa tecnologia, ed è stato testato e connesso alla rete elettrica per brevi periodi nel 2005 e nel 2010, accumulando nel 2010 più di 600 ore di funzionamento.



### *Poseidon – Floating Power Plant – Danimarca*

È una struttura galleggiante ancorata al suolo marino alla quale sono collegati dei galleggianti, che grazie al moto ondoso oscillano azionando un sistema idraulico. Questo sistema fa aumentare la pressione dell'acqua nel circuito idraulico che viene poi inviata nella turbina. La lunghezza finale del *Poseidon* sarà di 230 m, e comprenderà 10 galleggianti. Questa struttura è stata studiata anche per consentire l'installazione di turbine eoliche off-shore.



Attualmente si sta testando un prototipo in scala ridotta (lunghezza di 37 m) ad Onsevig in Danimarca, che comprende anche tre turbine eoliche installate sulla piattaforma. Il prossimo passo a seguito di risultati positivi è la costruzione di un prototipo in scala completa.

*PowerBuoy – Ocean Power Technologies Inc. – New Jersey (USA)*

È un sistema molto semplice: consiste in una boa semi sommersa ancorata al suolo marino grazie a delle catene. La parte sommersa rimane fissa, mentre in superficie un galleggiante oscilla verticalmente grazie al moto delle onde. Questo movimento aziona i pistoni idraulici all'interno della boa che consentono a un generatore elettrico di produrre energia. Attualmente un modello da 150 kW si sta testando al largo di Invergordon. Oltre a questo, la società ha testato anche modelli di potenza inferiore, in grado di operare automaticamente, adatti per le zone più isolate. È in sviluppo il progetto di costruzione di un modello da 500 kW.



*Seabased – Seabased AB – Svezia*

Composto da una parte galleggiante e un'altra sommersa appoggiata e ancorata al suolo marino, collegate per mezzo di un cavo. Il galleggiante, mosso dalle onde, oscilla verticalmente. Grazie a questo movimento, aziona il traslatore di un generatore lineare presente nella struttura sul fondale, che è collegato al galleggiante in superficie attraverso il cavo. Attualmente sono in corso dei test su un prototipo alla Uppsala University, che termineranno nel 2014 (erano iniziati nel 2006).



*Wavebob – Wavebob Ltd. - Irlanda*

È composto da due parti collegate tramite pistoni idraulici, una galleggiante e una semisommersa con una zavorra nella parte sommersa. La parte galleggiante oscilla verticalmente se sollecitata dal moto ondoso. La presenza della zavorra favorisce il movimento relativo tra le due parti del dispositivo, azionando così i pistoni idraulici, che azionano così dei generatori presenti nell'apparecchio. Dopo test di laboratorio, attualmente un modello in scala 1 a 4 del Wavebob si sta testando nella baia di Galway nell'Irlanda del Nord. Per il modello in scala completa è prevista la potenza di 1,5 MW.





*Wave Dragon – Wave Dragon ApS - Danimarca*

Il principio di funzionamento di questo dispositivo è quello di innalzare il livello del moto ondoso in modo da accumulare una riserva d'acqua in un bacino (più elevato rispetto al livello del mare), in modo che questa venga fatta tornare in mare attraverso turbine idrauliche. Fino allo scorso anno è stato testato in Danimarca, in Nissum Bredning, un prototipo della potenza di 20 kW. In futuro sono previsti anche studi sull'impatto ambientale della struttura. Un impianto dimostrativo è previsto al largo di Milford Haven (Regno Unito) che verrà rimosso dopo 3-5 anni di studi.



## 5.4 – SVILUPPI FUTURI

Come per le turbine marine, anche questo settore è in forte espansione. Diversi sono i principi attraverso i quali si può estrarre energia dal moto ondoso, e molti di più sono i dispositivi che convertono questa forma di energia in energia elettrica. Pochi di questi sono “vicini” ad una fase di commercializzazione, molti invece in fase di studio e di prova. Lo svantaggio maggiore di questi dispositivi, aldilà dell'aspetto tecnologico ancora da sviluppare, è l'impatto visivo che questi provocano all'ambiente marino. Infatti per poter catturare l'energia delle onde è necessario che almeno una sezione o l'intera struttura sia galleggiante e quindi visibile in superficie. Inoltre le dimensioni di questi dispositivi non sono certo trascurabili (arrivano anche fino a centinaia di metri). Si potrebbe quindi prospettare per questa tecnologia la stessa problematica che riguarda gli aerogeneratori. Questo potrebbe verificarsi quando la tecnologia sarà abbastanza matura per una diffusione a livello commerciale. C'è inoltre da chiedersi che impatto possano avere questi dispositivi sulle specie animali che vivono nell'ambiente marino. Studi approfonditi sul tema sono in corso. Sicuro è che il sempre più presente bisogno di produrre energia elettrica in modo pulito sarà un forte catalizzatore per lo sviluppo di questi sistemi. Grazie anche a questo, possiamo aspettarci che fra 10-15 anni i primi impianti per la produzione di energia elettrica da moto ondoso saranno operativi.



## **6 – PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA GRADIENTE TERMICO**

### **6.1 – CICLI UTILIZZATI**

In questo caso la produzione di energia elettrica viene effettuata sfruttando la differenza di temperatura tra l'acqua superficiale e l'acqua presente in profondità. Gli impianti possono essere situati a terra, galleggianti oppure sul fondo marino a circa 100 metri di profondità. L'acqua dell'oceano viene utilizzata per riscaldare e raffreddare un fluido che opera in un ciclo convenzionale a vapore. Il fluido motore utilizzato deve avere una temperatura di ebollizione bassa, per esempio ammoniaca o una miscela acqua-ammoniaca. Una volta riscaldato e fatto bollire, viene mandato in turbina e successivamente condensato utilizzando l'acqua più profonda e fredda. Il fluido quindi ripercorre il ciclo continuamente.

L'acqua fredda necessaria che viene portata in superficie per condensare il fluido che opera nel ciclo, può essere riutilizzata per condizionamento di interni e per coltivazioni marine; è possibile ricavare inoltre acqua desalinizzata.

Si possono scegliere tre tipi di ciclo: chiuso, aperto e ibrido.

Un ciclo chiuso si basa principalmente in un ciclo Rankine, dove il fluido motore, attraverso scambiatori di calore, viene riscaldato e condensato. Un esempio di ciclo chiuso si può vedere nell'immagine sottostante. Le parti più importanti del ciclo ai fini del rendimento sono gli scambiatori di calore e la turbina.

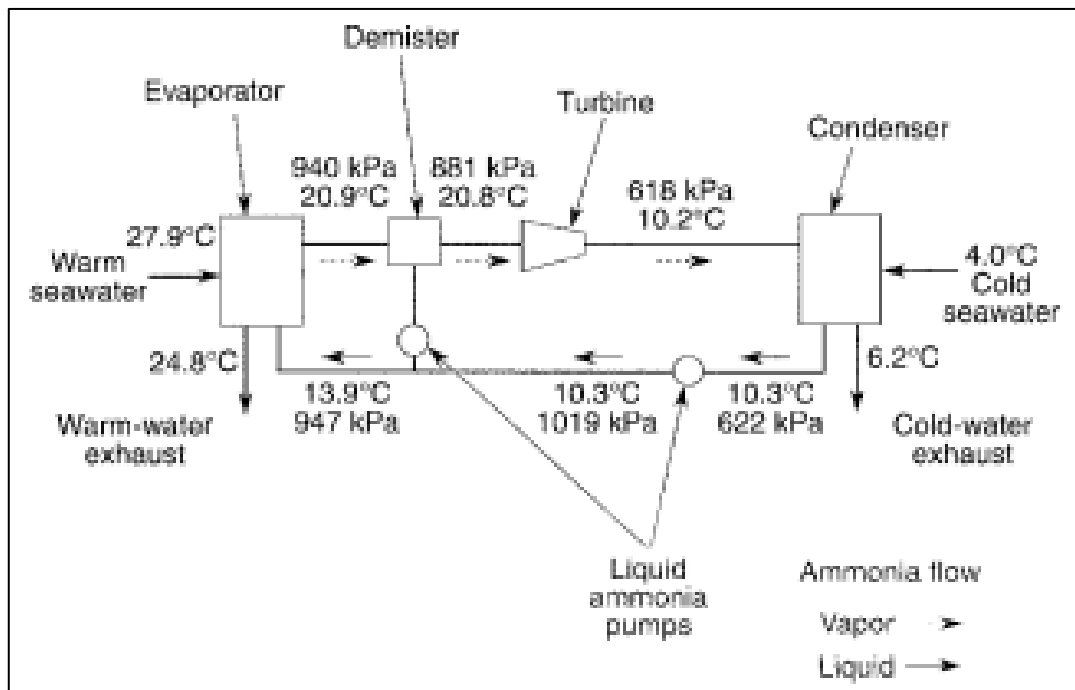


Figura 6.1- Ciclo chiuso

Nel ciclo aperto invece si utilizza come fluido motore l'acqua superficiale dell'oceano. Questa viene usata per produrre vapore a bassa pressione che viene successivamente mandato in turbina. Dopo la turbina il vapore viene condensato utilizzando l'acqua fredda proveniente dalle profondità dell'oceano. Dopo esser stato condensato, il vapore torna ad essere acqua, e da questa si può ricavare acqua desalinizzata, oppure può essere scaricata nuovamente nell'oceano. Un generico schema di ciclo aperto è come quello nella figura sottostante. Viene definito ciclo aperto poiché il vapore condensato non viene inviato nuovamente nell'evaporatore, ma utilizzato per altri scopi; l'acqua necessaria all'evaporatore viene continuamente pompata dal mare.

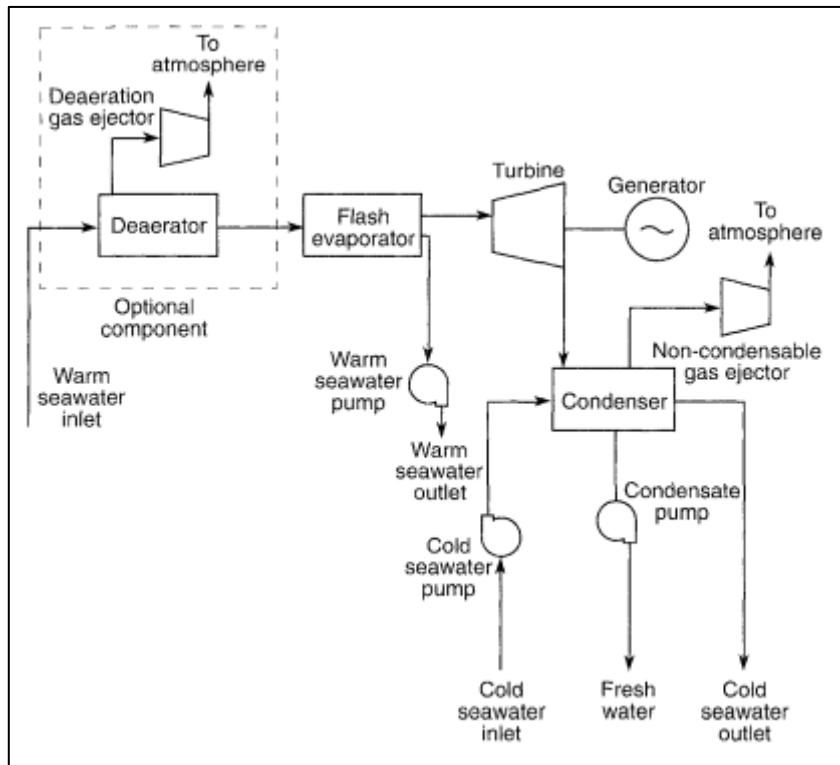


Figura 6.2 - Ciclo aperto

Si è cercato di unire i vantaggi dei cicli aperti e chiusi sviluppando un ciclo ibrido. In questo caso si utilizza sempre acqua superficiale che viene mandata nell'evaporatore, che in questo caso però serve per riscaldare il fluido motore che agisce in un ciclo chiuso. In questo modo il fluido motore in seguito al riscaldamento viene inviato in turbina e quindi al condensatore, in cui viene condensato sfruttando l'acqua più fredda dell'oceano, per poi continuare il ciclo. In questo modo si produce insieme energia elettrica ed acqua desalinizzata (utilizzando scambiatori di calore a fascio tubiero). L'acqua desalinizzata può essere usata per scopi alimentari o industriali.

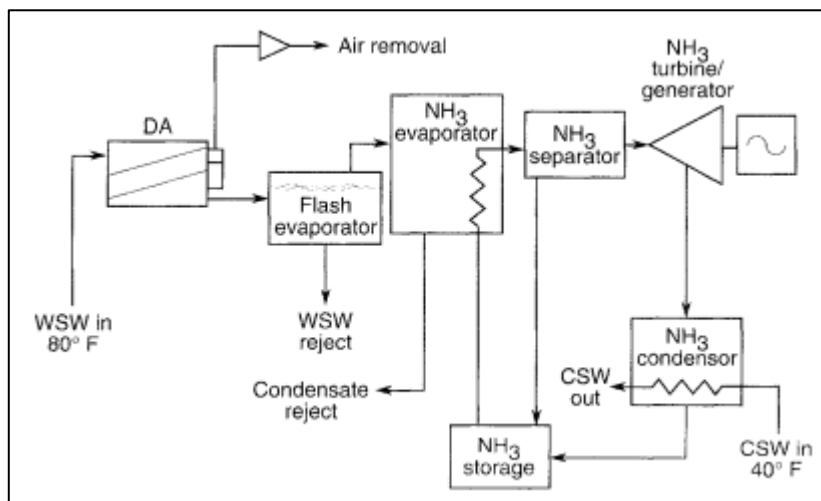


Figura 6.3 - Ciclo ibrido

## 6.2 – STATO CORRENTE

Attualmente i paesi che hanno maggiormente sviluppato questa tecnologia sono gli Stati Uniti e il Giappone. Tuttavia il settore è prevalentemente in fase di sviluppo, e la soluzione a vari problemi richiede uno sviluppo tecnologico: per esempio le turbine, che lavorano a pressioni basse, devono essere molto grandi per poter raggiungere un livello di potenza adatto.

Comunque piccoli impianti dimostrativi e sperimentali sono stati costruiti e testati maggiormente in Stati Uniti e Giappone. È lontana ancora la costruzione di vere e proprie centrali, ma investimenti e studi sono in corso per lo sviluppo e il miglioramento del processo di trasformazione.

## 6.3 – PRINCIPALI IMPIANTI

Già dal 1979 sono stati svolti prove su piccoli impianti pilota. In particolare in quell'anno, si è testato un impianto (ciclo chiuso) da 50 kW montato a bordo di una nave della marina, situato al largo di Keahole Point, produceva una potenza netta di 15 kWe. Nel 1981 il Giappone testò un impianto situato a terra nella Repubblica di Narau, sempre a ciclo chiuso, della potenza di 100kW, con una potenza netta di 31,5 kWe. Più tardi nel 1993, un impianto a ciclo aperto sempre a Keahole Point, nei test produsse 50 kWe.

## 6.4 – SVILUPPI FUTURI

Il futuro per l'OTEC è abbastanza incerto e varie problematiche devono essere affrontate per migliorare l'affidabilità e il rendimento degli impianti. Innanzitutto il problema riguarda il fluido motore: l'ammoniaca ha proprietà migliori, è poco costosa e facilmente reperibile, per contro è tossica e infiammabile. Le alternative come etano, propano e butano sono anch'essi infiammabili, e altri possibili fluidi come i fluorocarboni sono dannosi per l'ozono. Lavorando a basse pressioni, il sistema deve essere ben sigillato per scongiurare perdite troppo elevate. Un altro problema è il degradamento delle prestazioni degli scambiatori di calore causate dalla presenza di organismi nell'acqua dell'oceano. Anche una piccolissima deposizione di organismi biologici sugli scambiatori (25-50  $\mu\text{m}$ ) può causare una perdita di efficienza pari al 40-50%. Rispetto alle precedenti tecnologie per la produzione di energia elettrica, questa è sicuramente ad uno stadio di sviluppo inferiore, ma ha il grande vantaggio che la produzione di energia può essere continua, vantaggio che ha anche rispetto alle altre fonti di energia rinnovabile, e può contribuire anche con la produzione di acqua desalinizzata e in altre attività.

## **7 – COSTI ATTESI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DAL MARE**

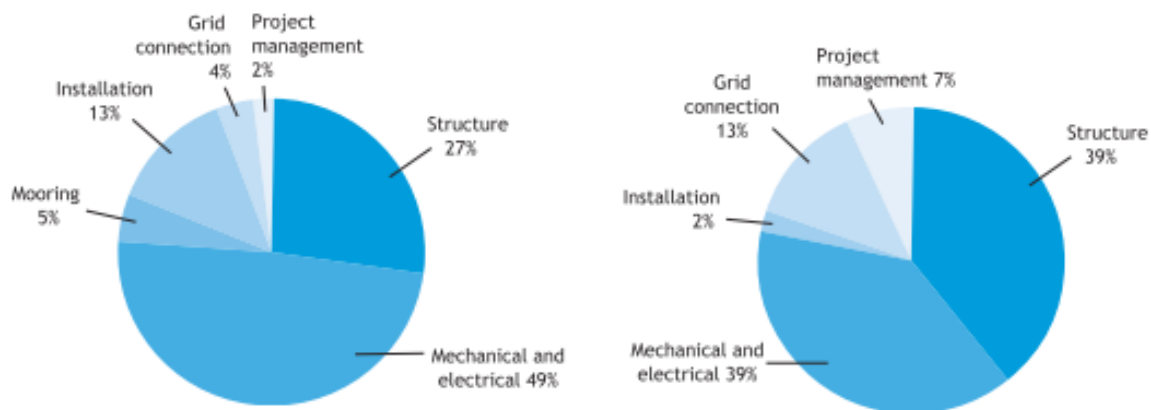
Nella determinazione dei costi di produzione dell'energia elettrica si devono considerare i diversi costi di investimento, i costi di esercizio e manutenzione, i costi relativi al combustibile utilizzato e l'energia prodotta. Ovviamente per le fonti rinnovabili, e quindi anche le forme di energia qui descritte, il costo del combustibile è pari a zero. Quindi si considerano soltanto i costi di investimento, di esercizio e manutenzione e l'energia prodotta. In questo capitolo vedremo quali sono i costi attuali e quelli previsti nel futuro, con riferimento anche al costo delle diverse tecnologie di produzione, anche non rinnovabili. In questo studio si ipotizza un tasso di sconto del 15% e un parco di produzione di massimo 10MW.

### **7.1 – SUDDIVISIONE DEI COSTI**

#### **Costi di investimento**

I costi di investimento sono costi da affrontare ancora prima dell'entrata in funzione dell'impianto. Di questi costi fanno parte: il costo di produzione dello stesso dispositivo atto ad effettuare la conversione di energia, il costo associato alla sua installazione, costruzione delle strutture di supporto e allacciamento alla rete. La ripartizione dei costi varia tra diversi dispositivi e dipende anche dal sito scelto per l'installazione dello stesso. Il settore è in forte sviluppo, quindi i costi di investimento oggi sono maggiori di quanto non saranno negli anni seguenti, ma diminuiranno con gli sviluppi tecnologici futuri. Ovviamente i costi di investimento variano anche in funzione di quanti dispositivi si desidera installare, e dal sito in cui andranno ad operare. Vengono espressi solitamente in €/kW.

Esempi sulla ripartizione dei costi seguono nelle figure.

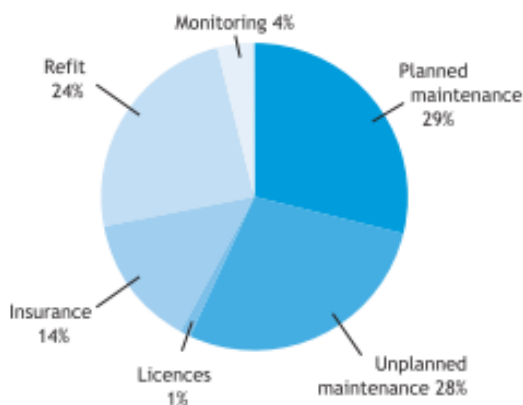


**Figura 7.1 - Suddivisione costi investimento; impianto a moto ondoso (sinistra), impianto a turbine marine (destra)**

### Costi di esercizio e manutenzione

Anche questi costi sono suddivisi in varie categorie: manutenzione ordinaria e straordinaria, revisioni dei componenti, licenze ed assicurazioni per permettere al dispositivo di essere installato e gestire i rischi associati, e il continuo monitoraggio delle condizioni del mare. Anche questi dipendono fortemente dal tipo di dispositivo usato e dal sito in cui esso opera. Sono molto più difficili da calcolare rispetto ai costi capitali poiché non c'è molta esperienza su questo tipo di operazioni. Si possono comunque desumere dall'esperienza acquisita nel settore dell'eolico off-shore, o delle condutture di gas e petrolio. Anche questi costi si possono considerare proporzionali alla potenza installata.

Di seguito un esempio di ripartizione dei costi di esercizio e manutenzione.



**Figura 7.2 - Suddivisione costi esercizio e manutenzione**



### **Prestazioni del dispositivo**

Le prestazioni dipendono da: l'energia disponibile della risorsa in un determinato sito, il sistema di cattura dell'energia, e la modalità di trasformazione di quest'ultima (conversione da meccanica in elettrica). Le prestazioni variano in funzione dei dispositivi, della loro distribuzione e collocazione. Sarebbe giusto studiare ognuno di questi nel caso specifico, ma è possibile effettuare osservazioni generali su gruppi di dispositivi e sulle condizioni adatte per ottenere le migliori prestazioni. Le grandezze che definiscono le prestazioni sono le seguenti: produzione annuale media di energia e ore di produzione alla potenza nominale.

## **7.2 – COSTI ATTUALI**

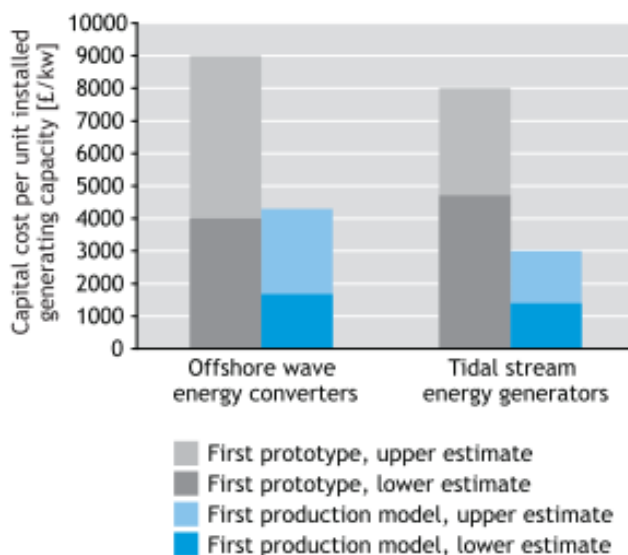
Per il calcolo dei costi attuali dell'energia prodotta si utilizza la seguente formula:

$$\text{Costo dell'energia} = \frac{\text{costo del capitale} + \text{costi di esercizio e manutenzione}}{\text{energia prodotta}}$$

Tutti i costi devono essere calcolati attualizzando il valore secondo il tasso di sconto, relativamente ad un certo intervallo di tempo. In questo studio si applica un tasso di sconto del 15%, abbastanza elevato a causa dei rischi associati nell'investire in questo settore non ancora consolidato.

Il costo del capitale è ben raffigurato dall'immagine sottostante, che confronta il costo per unità di potenza per produrre il primo prototipo e il primo modello per la produzione. Le fasce di incertezza sono ampie a causa del gran numero di dispositivi finora costruiti.

## Capitolo 7 – Costi attesi per la produzione di energia elettrica dal mare

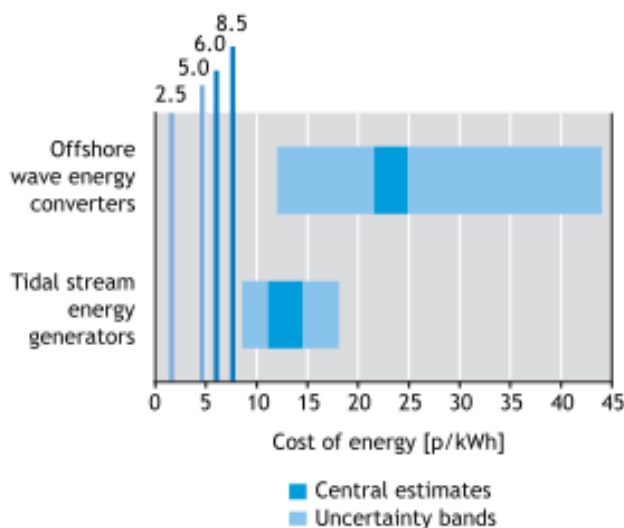


**Figura 7.3 - Costi di investimento**

Per i WEC i costi vanno da circa 4600 €/kW fino a 10400 €/kW con riferimento alla costruzione del primo prototipo. Mentre i costi diminuiscono per la costruzione del primo modello, variando tra 2000 €/kW e 5000 €/kW.

I costi per dispositivi che sfruttano le maree e le correnti marine non sono di molto inferiori a quelli sopra riportati: da 5500 a 9000 €/kW per il primo prototipo, da 1600 a 3500 €/kW per il primo modello. Questi costi sono maggiori rispetto alle fonti tradizionali e a quelle rinnovabili presenti. Bisogna però tener conto che il settore è in evoluzione ed è prevedibile un calo significativo dei costi nel tempo, sia grazie a maggiori conoscenze che alla diffusione di questi sistemi.

Con i dati considerati, il costo dell'energia si vede nella figura seguente:



**Figura 7.4 - Costo attuale dell'energia elettrica**

L'incertezza dovuta ai risultati dipende dalla presenza di numerosi dispositivi (con più possibilità di scelta per i WEC) e dalla non perfetta conoscenza dei costi di esercizio e manutenzione.

Dall'analisi della figura, che riporta anche i vari costi per le altre tecnologie di produzione, si nota la scarsa competitività delle tecnologie finora descritte, con leggero vantaggio per quanto riguarda lo sfruttamento delle maree e correnti marine. Questo è dovuto prevalentemente al fatto che le prestazioni di questi dispositivi sono più certe rispetto a quelle degli WEC.

Per dare dei valori numerici, il costo per i WEC sono compresi tra 14 e 52 c/kWh, diversamente per gli altri dispositivi l'intervallo va da 11 a 21 c/kWh. Anche in questo caso si è lontani dalla competitività con le risorse convenzionali, ma i costi sono previsti in diminuzione, come vedremo nel prossimo capitolo.

### **7.3 – COSTI FUTURI ENERGIA DA MOTO ONDOSO**

Per comprendere come i costi potrebbero diminuire nel futuro, è fondamentale definire il fattore di apprendimento, che indica la riduzione del costo ad ogni raddoppio della potenza installata (per esempio, se 1€ è il costo della prima unità, la seconda costerà 0.9€, considerando un fattore di apprendimento del 10%). Contribuisce alla diminuzione dei costi anche il passaggio ad economie di scala. Ma in una fase di sviluppo, è molto importante che si riduca al massimo il costo dell'energia prima di passare alla produzione di un gran numero di dispositivi e alla loro relativa installazione. Questo vuol dire effettuare studi approfonditi sul funzionamento e il rendimento di questi sistemi.

In questo studio si ipotizza che il fattore di apprendimento per i generatori da correnti marine e di marea sia del 5-10%, mentre per i WEC sia del 10-15%. La differenza nasce dal fatto che i primi sistemi offrono meno alternative, mentre per i secondi sono molto più numerosi i dispositivi attualmente disponibili. Inoltre viene considerata una durata media di vita dei dispositivi di 20 anni. Per la determinazione dei costi futuri riguardanti gli WEC, sono stati studiati tre diversi scenari che si differenziano per il fattore di apprendimento e per il costo iniziale dell'energia.

#### **7.3.1 – SCENARIO 1 (lento sviluppo tecnologico)**

- fattore di apprendimento del 10%;
- costo iniziale dell'energia: 29c/kWh.

Con l'aiuto del grafico, che riporta i costi delle diverse tecnologie convenzionali, si può notare che con circa 5GW di potenza installata si raggiunge una buona competitività con le tecnologie convenzionali più costose. Aumentando la potenza installata il costo si riduce ulteriormente,

divenendo sempre più competitivo, ma non raggiunge mai il livello minimo delle tecnologie convenzionali.

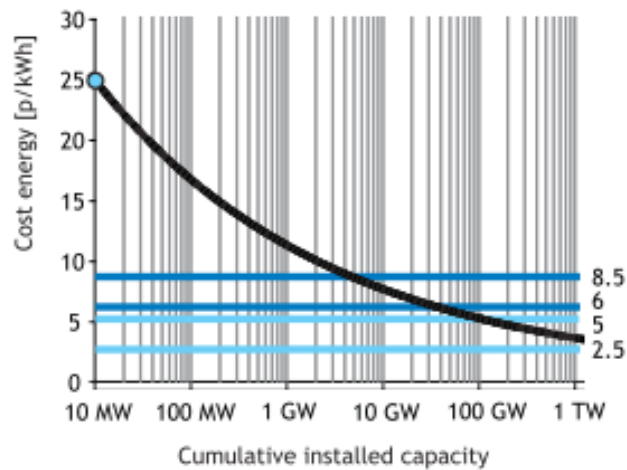


Figura 7.5 - Costi futuri energia elettrica da moto ondoso, scenario 1

### 7.3.2 – SCENARIO 2 (veloce sviluppo tecnologico)

- fattore di apprendimento del 15%;
- costo iniziale dell'energia: 25c/kWh.

In questo scenario la diminuzione dei costi è più marcata rispetto al caso precedente grazie al maggior fattore di apprendimento. La tecnologia diverrebbe competitiva in tempi più brevi, precisamente con una potenza installata di circa 250MW. Con l'aumento della potenza installata il costo dell'energia diverrebbe anche minore degli impianti convenzionali.

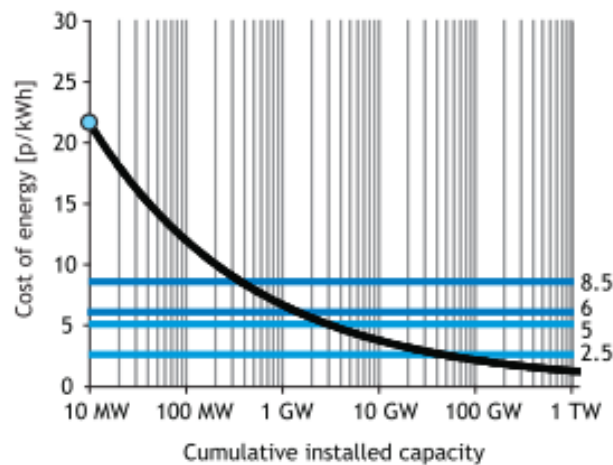


Figura 7.6 - Costi futuri energia elettrica da moto ondoso, scenario 2

### 7.3.3 – SCENARIO 3

- fattore di apprendimento: 15%;
- viene ipotizzato un forte miglioramento che porta il costo dell'energia a 12c/kWh con una potenza installata di 50 MW.

In questo caso la tecnologia raggiunge più velocemente rispetto ai precedenti scenari una buona competitività, fino a divenire più economica delle fonti tradizionali con una potenza installata di circa 10 GW.

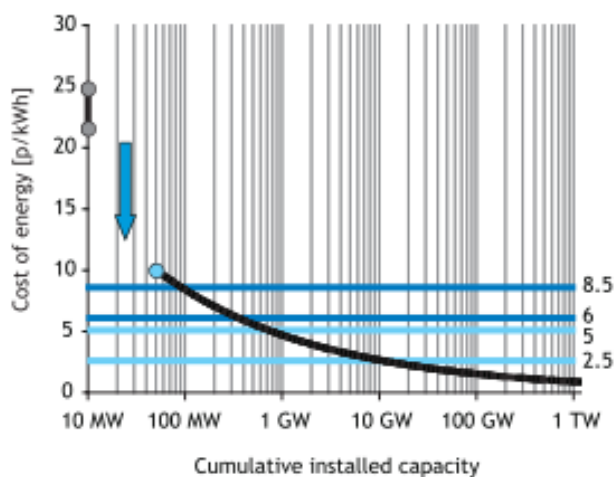


Figura 7.7 - Costi futuri energia elettrica da moto ondoso, scenario 3

L'obiettivo finale è ottenere un costo il più possibile competitivo. Questo avviene negli scenari 2 e 3. Per ottenere questi risultati sono necessari investimenti per l'installazione di impianti di produzione. Per esempio, per raggiungere il livello di 10c/kWh (8,5p/kWh), sono necessari circa 21 miliardi di Euro per lo scenario 1, e circa 900 milioni per lo scenario 2. La grande differenza è causata dal diverso fattore di apprendimento, e indica che con un limitato fattore di apprendimento è estremamente dispendioso ridurre il costo dell'energia a livelli competitivi.

Per il raggiungimento del costo di 7c/kWh (6p/kWh) sono invece necessari 2,5 miliardi di € per lo scenario 2, mentre per lo scenario 3 ci vorrebbero circa 570 milioni di €.

È da tenere in considerazione che se il costo dell'energia da fonti tradizionali subisse un aumento a causa del rincaro del combustibile, lo sfruttamento di energie rinnovabili diverrebbe a quel punto sempre più conveniente.

## 7.4 – COSTI FUTURI ENERGIA DA CORRENTI MARINE E DI MAREA

Per quanto riguarda lo sfruttamento delle maree e correnti marine, non vengono ipotizzati scenari poiché le prestazioni sono molto più certe e solo marginalmente migliorabili. In particolare, preso per esempio il Regno Unito, che ha una risorsa stimata di circa 2,8 GW (ricavabile in modo economicamente conveniente), preso come limite per la potenza massima installabile, il costo calerebbe come illustrato in figura, raggiungendo una buona competitività con le tecnologie convenzionali. La linea continua rappresenta il valore medio stimato, mentre le linee tratteggiate indicano la banda di incertezza.

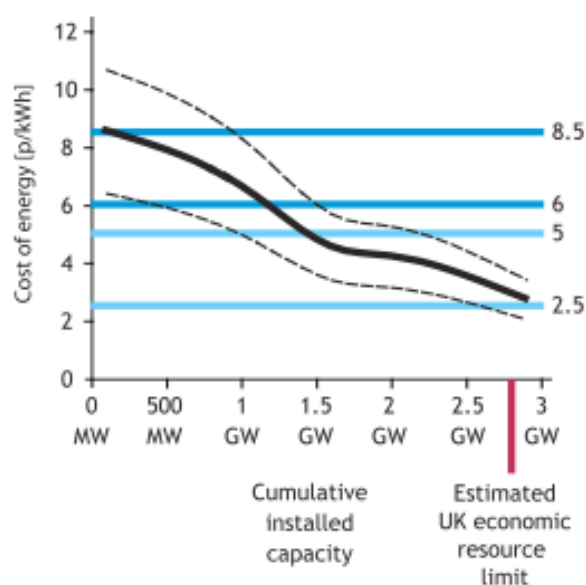


Figura 7.8 - Costi futuri energia elettrica da correnti marine e di marea

## 8 – PRINCIPALI COLLABORAZIONI CON GRANDI COMPAGNIE DI DISTRIBUZIONE

I ruoli che possono assumere le grandi compagnie sono sia ricerca e sviluppo di prototipi sia le dimostrazioni di grandi o piccoli impianti pilota. Nella seguente tabella sono descritte le diverse aziende, divise per nazione, che sono coinvolte in questo settore.

Nazione	Utility	Tipo di attività
<b>Canada</b>	BC Hydro	Valutazione della risorsa, integrazione di tecnologie idrocinetiche,
	Nova Scotia Power Inc.	Sviluppo siti, trasmissione
<b>Danimarca</b>	Thy-MorsEnergi	Coinvolta nella connessione alla griglia del Wave Star Energy
<b>Irlanda</b>	Electricity Supply Board	Supporta l'introduzione dell'energia oceanica nel mix energetico, sviluppo di un'area per testare gli WEC
	Bord Gais Eireann (BGE)	Investimenti in numerose tecnologie (energia da moto ondoso) e supporto agli enti coinvolti
<b>Korea</b>	Korea Water Resource Corporation	Costruzione della Shiwa tidal barrage power plant
	Korea East-West Power Co., Ltd.	Opera nell'impianto di Uldomok (correnti marine)
	Korea Western Power Co., Ltd.	Studi di fattibilità per Garorim tidal barrage power site
	Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd.	Studi di fattibilità per Incheonman tidal barrage power site
	Korea Midland Power Co., Ltd.	Studi di fattibilità per Gangwa tidal barrage power site
	Hyundai Heavy Industry Co., Ltd.	Sviluppo e dimostrazione di dispositivo su scala completa (correnti di marea)
	Ocean Space, Inc.	Sviluppo e dimostrazione di dispositivo a scala ridotta (correnti di marea)
	Taekyung Industry Co., Ltd.	Sviluppo e dimostrazione di dispositivo a scala ridotta (moto ondoso)
Ecocean Co., Ltd	Sviluppo di turbine marine	

Capitolo 8 – Principali collaborazioni con grandi compagnie di distribuzione

<b>Svezia</b>	Vattenfall AB	Ricerca e sviluppo
	Fortum AB	Ricerca e sviluppo
	Statkraft AS	Ricerca e sviluppo
	Göteborg Energi AB	Ricerca e sviluppo
	Falkenberg Energi AB	Ricerca e sviluppo
<b>Messico</b>	Comisión Federal de Electricidad	Misurazione di correnti marine e onde
<b>Norvegia</b>	Hafslund AS	Supporto a progetto per correnti di marea
	Statkraft AS	Ricerca e sviluppo
	Tussa Kraft AS	Supporta il progetto SeaBased
	Hålogaland Kraft AS	Supporta il progetto Hydra Tidal
	Lofotkraft Holding AS	Supporta il progetto Hydra Tidal
	Hammerfest Energi AS	Proprietaria di una parte della Hammerfest Strøm AS
<b>Nuova zelanda</b>	Todd Energy	Ha acquisito il 30% di Crest Energy Kaipara Limited nel 2009
<b>Portogallo</b>	EDP	Dimostrazione e sviluppo di tecnologie
<b>Spagna</b>	IBERDROLA	Dimostrazione e sviluppo di tecnologie
<b>Regno Unito</b>	EON	Dimostrazione e sviluppo di tecnologie
	Scottish Power	Dimostrazione e sviluppo di tecnologie
	SSE Renewables	Dimostrazione e sviluppo di tecnologie
	RWE nPower	Sviluppo di progetti
	Edf	Sviluppo di progetti
	International Power	Sviluppo di progetti
	ESBI	Dimostrazione e sviluppo di tecnologie

Altre aziende sono anche state citate nelle descrizioni dei vari dispositivi presentati nei precedenti capitoli.



## CONCLUSIONI

Con il presente elaborato si è voluto dare una panoramica generale per quanto riguarda le tecnologie per lo sfruttamento dell'energia oceanica, in particolare quella ricavabile da correnti marine e di marea, dal moto ondoso e dal gradiente termico. L'energia presente sotto varie forme nei mari e negli oceani sarebbe da sola sufficiente a soddisfare l'attuale fabbisogno mondiale. Come si è visto, il settore è in forte crescita ed espansione, grazie anche alla necessità di produzione di energia elettrica a basso impatto ambientale. L'energia dal moto ondoso ha lo svantaggio di essere variabile nel corso del tempo, similmente a quella delle correnti di marea, anche se quest'ultime sono facilmente prevedibili a causa dei cicli lunari che sono periodici. Le correnti marine e ancor di più il gradiente termico invece, sono maggiormente costanti nel tempo, e consentono uno sfruttamento continuo dell'energia ivi presente. Le maggiori problematiche sono dovute all'ambiente marino, che, favorendo la corrosione dei materiali metallici, mette a dura prova gli stessi durante il funzionamento. Inoltre è da considerare il fatto di eventi atmosferici che potrebbero causare sollecitazioni elevate e la rottura del nostro dispositivo, che deve essere dimensionato per sopportare condizioni particolari, specialmente per quanto riguarda i WEC.

Come si è visto, molte tecnologie sono state studiate per lo sfruttamento di questa energia. Quelle più avanzate sono attualmente nello stato di test, per verificare il funzionamento e le prestazioni, in quello che sarà il loro ambiente futuro, l'oceano. Altre invece vengono testate in laboratori, e alcune non sono ancora state realizzate. Allo stato attuale, il settore più avanzato sembra essere quello dello sfruttamento delle correnti marine e di marea, che ha anche usufruito dell'esperienza nel campo eolico, essendo uguale il principio, ma diverso il fluido che scambia energia. Poi si presenta il settore che sfrutta il moto ondoso, leggermente in ritardo rispetto al precedente. Per ultimo lo sfruttamento del gradiente termico. Ovviamente non tutte le tecnologie oggi presenti saranno utilizzate in futuro, ma solo quelle che si mostreranno maggiormente affidabili e performanti, che consentiranno di ottenere un costo del chilowattora più competitivo possibile. Come per le altre rinnovabili, saranno necessari incentivi e investimenti per favorire lo sviluppo e la diffusione di questi sistemi.

Per quanto riguarda l'impatto ambientale, è difficile ora, vista la scarsa esperienza, dare indicazioni precise sulle conseguenze che queste tecnologie potrebbero avere sulla flora e sulla fauna dell'ambiente marino. Sono comunque in corso vari studi per verificare gli eventuali effetti negativi derivanti dallo sfruttamento di questa energia. Solo per i sistemi a bacino si sa che l'impatto ambientale è elevato, un fatto che ostacola, oltre al grande investimento iniziale, la costruzione di nuovi impianti di questo genere.

I costi per la produzione di energia elettrica con queste tecnologie sono attualmente elevati, ma sono previsti in calo, sia grazie al passaggio ad economie di scala, sia per l'aumento della potenza

installata. L'obiettivo principale è senza dubbio quello di arrivare a competere con le fonti rinnovabili tradizionali (eolico e solare), e insieme a queste aumentare la quota di energia elettrica prodotta da rinnovabili, requisito necessario per uno sviluppo sostenibile dal punto di vista ambientale.

## BIBLIOGRAFIA

- IEA, Key World Energy STATISTICS, 2010;
- [http://it.wikipedia.org/wiki/Energia\\_marina](http://it.wikipedia.org/wiki/Energia_marina);
- Applied Energy 87, pg. 398-409, 2010;
- Renewable and Sustainable Energy Reviews 6, pg. 405-431, 2002;
- John Brooke, Wave Energy Conversion, Ocean Engineering Series Editors, 2005;
- Coiro, Melone, Montella, Energia pulita dalle correnti marine: aspetti tecnici ed economici, Dip. di Progettazione Aeronautica, Università Degli Studi di Napoli "Federico II";
- William H. Avery, Chih Wu, Renewable Energy from the Ocean: A Guide to OTEC, Oxford University Press, 1994;
- Ocean Energy Conversion in Europe, Commissione Europea, 2006;
- Report on the state of ocean energy in Europe: technologies, test sites, and joint projects, 2010;
- [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_tidal\\_power\\_stations](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tidal_power_stations);
- Vincent de Laleu, presentazione La Rance Tidal Power Plant, Conferenza annuale BHA, ottobre 2009;
- <http://cogeneration.net/ocean-thermal-energy-conversion/>;
- A. Khaligh, O.C. Onar, Energy Harvesting, CRC Press, 2010;
- Carbon Trust, Future Marine Energy, 2006;
- I dati su ogni dispositivo sono stati integrati o riportati dai siti internet dei rispettivi produttori.
- IEA, Annual Report: Implementing Agreement on Ocean Energy Systems, 2010.