

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in  
Ingegneria Energetica



Stato dell'arte delle tecnologie di conversione dell'energia dal moto ondoso

Relatore: Prof. Paolo SILVA

Tesi di Laurea di:

Aurelio MANZONI Matr. 754714

Anno Accademico 2012 - 2013

# Indice Generale

## Introduzione

<b>1</b>	<b>Energia marina</b> .....	9
1.1	Moto ondoso.....	10
1.1.1	Condizioni di sfruttamento.....	10
1.1.2	Stagionalità.....	11
1.2	Maree.....	12
1.2.1	Corrente di marea.....	12
1.2.2	Escursione di marea.....	13
1.3	Gradiente termico.....	15
1.4	Gradiente salino.....	16
1.5	Corrente marina.....	17
<b>2</b>	<b>Energia delle onde</b> .....	19
2.1	Fisica delle onde.....	19
2.2	Fenomenologia delle onde.....	21
2.3	Risorsa globale.....	23
<b>3</b>	<b>Classificazione delle tecnologie di conversione</b> .....	31
3.1	Gli albori della ricerca.....	31
3.2	Storia recente della ricerca.....	32
3.3	Classificazione dei convertitori.....	33
3.4	Posizione rispetto alla costa.....	33
3.4.1	Dispositivi onshore.....	34
3.4.2	Dispositivi nearshore.....	34
3.4.3	Dispositivi offshore.....	35
3.5	Principio di funzionamento.....	35
3.5.1	Attenuator.....	35
3.5.2	Point Absorber.....	36
3.5.3	Oscillating Wave Surge Converter.....	38
3.5.4	Oscillating Water Column.....	39
3.5.5	Dispositivo Overtopping.....	41
3.5.6	Submerged Pressure Differential.....	42
3.5.7	Bulge Wave.....	44
3.5.8	Rotating Mass.....	45
3.6	Sistema di Power Take-Off.....	46
3.6.1	Turbina ad aria.....	48
3.6.2	Sistemi idraulici.....	52

3.6.3	Generatore lineare.....	53
3.6.4	Turbina idraulica.....	55
3.6.5	Problematiche dei PTO.....	55
3.7	Difficoltà tecnologiche dei WEC.....	56
<b>4</b>	<b>Prototipi e modelli pre-commerciali proposti nel mondo.....</b>	<b>59</b>
4.1	WestWave Project e altri WEC.....	59
4.1.1	Oyster.....	59
4.1.2	Pelamis.....	63
4.1.3	OE Buoy.....	66
4.1.4	Wavebob.....	68
4.1.5	Wello Oy.....	70
4.1.6	Seatricity.....	73
4.1.7	WaveStar.....	75
4.1.8	Wave Rotor.....	76
4.1.9	Power Buoy.....	77
4.1.10	Wave Pioneer.....	81
4.1.11	CETO.....	81
4.1.12	Langlee.....	82
4.1.13	WaveRoller.....	83
4.1.14	Wave Dragon.....	86
4.1.15	AWS-III.....	87
4.2	Tecnologia italiana.....	89
4.2.1	Iswec.....	89
4.2.2	40SouthEnergy.....	91
4.2.3	Progetto Agire.....	93
4.2.4	Rewec 3.....	96
4.3	Desalinizzazione.....	98
4.3.1	Desalinizzazione a moto ondoso.....	99
4.3.2	paesi con scarsità d'acqua.....	99
4.3.3	Costo di distribuzione.....	100
4.3.4	Sistema Oyster.....	100
<b>5</b>	<b>Programmi di ricerca in corso e wave farm in progetto.....</b>	<b>103</b>
5.1	Progetti di ricerca.....	103
5.1.1	Sviluppo di un progetto.....	104
5.1.2	Pico.....	106
5.1.3	Lysekil Project.....	109
5.1.4	European Marine Energy Centre.....	112
5.1.5	DanWEC Hanstholm.....	113
5.1.6	Wave Hub.....	115
5.1.7	Yongsoo.....	117

5.1.8	Bimep.....	118
5.1.9	Oosterschelde Tidal Project.....	119
5.1.10	Belmullet.....	120
5.1.11	Santoña wave farm.....	122
5.1.12	FlanSea Project.....	123
5.1.13	Pilot Zone.....	125
5.1.14	Perth Wave Energy Project.....	126
5.2	Wave Farm.....	128
5.2.1	Limpet.....	128
5.2.2	Mutriku.....	129
5.2.3	Aguçadoura.....	131
5.2.4	Benera.....	133
5.2.5	Aegir.....	134
5.2.6	Lewis Wave Energy Farm.....	136
5.2.7	Reedsport OPT Wave Park.....	137
5.2.8	Coos Bay OPT Wave Park.....	138
5.3	Wave farm in Italia.....	140
5.3.1	Iswec.....	140
5.3.2	40SouthEnergy.....	144
5.3.1	Rewec 3.....	145
<b>6</b>	<b>Esempio di dimensionamento di un impianto e stima delle potenzialità della ricerca in Italia.....</b>	<b>149</b>
6.1	Dimensionamento di una wave farm in Irlanda.....	149
6.1.1	Capacity factor dell'impianto.....	149
6.1.2	Impianto a moto ondoso in Italia.....	149
6.2	Dati energetici del Mediterraneo.....	149
6.3	Distribuzione della potenza ondosa nel Mediterraneo.....	150
6.4	Distribuzione della potenza ondosa lungo le coste italiane.....	150
6.5	Variabilità della potenza ondosa.....	153
6.6	Normativa e Incentivi in Italia.....	155
6.7	Dimensionamento wave farm in Irlanda.....	157
<b>7</b>	<b>Impatto ambientale.....</b>	<b>161</b>
7.1	Impatto sul sistema abiotico e i processi costieri.....	161
7.2	Qualità dell'aria.....	161
7.2.1	Disturbo del rumore sui mammiferi marini.....	162
7.2.2	Disturbo del rumore sui pesci.....	162
7.3	Qualità dell'acqua.....	162
7.4	Impatto sul sistema biotico.....	163
7.4.1	Effetti della barriera corallina artificiale.....	164
7.4.2	Campo elettromagnetico.....	164



7.5	Mammiferi marini.....	165
7.6	Uccelli.....	166
7.7	Dispositivi onshore.....	168
<b>Conclusione .....</b>		<b>169</b>
<b><i>Bibliografia .....</i></b>		<b><i>171</i></b>

## Introduzione

Il consumo mondiale di energia crescerà considerevolmente nei prossimi decenni, così come quello dell'Unione Europea. Di pari passo aumenta anche la consapevolezza degli Stati membri, che una produzione tradizionale di energia contribuisca seriamente all'inquinamento ambientale, rendendo urgente il bisogno di una generazione di energia non inquinante. In ultimo l'incidente di Fukushima, nell'anno del venticinquesimo anniversario di Chernobyl, ha dato un forte contributo alla sensibilizzazione dei governi per le politiche energetiche rinnovabili. Il settore energetico è stato quindi spinto in un processo di rinnovo e di ripensamento delle strategie energetiche, verso soluzioni più rinnovabili. Nonostante l'uso delle forme rinnovabili fosse in crescita, la crisi economica globale ebbe un forte impatto con una domanda di energia in calo e prezzi decrescenti del carbone. Nell'Unione Europea il consumo lordo totale calò da circa 75,362 PJ/a nel 2008, a 73,352 PJ/a nel 2010, mentre nello stesso periodo il consumo di energia rinnovabile crebbe da 6000 PJ/a a 7200 PJ/a. La frazione di energia prodotta rinnovabile sul totale di energia lorda consumata nel 2010 in Europa è il 12,5% [1]. Nell'ambito dell'evoluzione tecnologica in questo campo il moto ondoso sta emergendo. Infatti la tecnologia suscita un interesse crescente da parte dei governi e delle industrie, nonostante sia relativamente nuova, e con costi non competitivi come quelli dell'eolico. Un'importante caratteristica del moto ondoso è quella di avere la più alta densità di energia tra tutte le fonti rinnovabili. I vantaggi più importanti sono l'alta disponibilità e l'alta prevedibilità della risorsa, mentre la tecnologia è caratterizzata da un basso impatto visivo e da nessuna emissione di CO<sub>2</sub>. Il moto ondoso può così contribuire ad un mix energetico rinnovabile per aiutare a frenare l'attuale dipendenza dai combustibili fossili. Dopo più di trent'anni passati confinato a ricerca accademica, il progresso del moto ondoso ha raggiunto uno stadio quasi maturo, presentandosi come un'industria potenziale per il futuro. In questa tesi viene presentato lo stato dell'arte della tecnologia a disposizione del moto ondoso.

## Sommario

Gli oceani e i mari contengono un'enorme quantità di energia che può essere sfruttata per la produzione di energia elettrica. Lo sviluppo della tecnologia e l'aumento dei prezzi degli idrocarburi incentivano la possibilità di sfruttamento della risorsa ondosa. A livello globale la ricerca è rivolta alla realizzazione di dispositivi in grado di adattarsi ai climi ondosi più energetici degli oceani, il cui ritorno economico sembra essere più conveniente. Nella tesi si definisce lo stato dell'arte della tecnologia dei convertitori a moto ondoso, a partire dai centri di ricerca più importanti, fino alle centrali a moto ondoso già in funzione o in corso d'opera.

**Parole chiave:** wave energy converter, moto ondoso, wave farm, energia marina, mar mediterraneo

## Abstract

The oceans and the seas contain a huge amount of energy, which can be exploited for production of electricity. Technology development and rise of oil price, enhance the possibility of exploiting wave resource. Research is globally addressed to realize devices which are able to survive in more energetic ocean wave climate, and the economical feasibility seems to be more promising. In this thesis the state of the art of the wave energy converters is defined, from the most important test sites, to the already operating wave farm or the planned ones.

**Keywords:** wave energy converters, wave energy, wave farm, marine energy, mediterranean sea



# Capitolo 1

## Energia marina

Il mare contiene un'enorme quantità di energia, che teoricamente può essere sfruttata dall'uomo per il proprio fabbisogno energetico. Essa è presente sotto diverse forme, tra cui le maree, le onde di superficie, le correnti, il gradiente termico e il gradiente di salinità. Si parla di energia cinetica per quanto riguarda le correnti di marea o le correnti marine, che sono mosse da forze gravitazionali, mentre le onde del mare, spinte dal vento, derivano indirettamente dall'energia solare. Tutte le diverse forme elencate, possono essere impiegate per la generazione di elettricità, attraverso l'uso di tecnologie ancora in sviluppo. La risorsa globale potenziale stimata per ciascuna di queste fonti è indicata nella seguente tabella:

Tabella 1.1. Fonti di energia del mare e stima delle risorse disponibili [1]

<b>Fonte di energia</b>	<b>Risorsa globale</b>
Moto ondoso	8000 – 80000 TWh/anno
Corrente di marea	> 800 TWh/anno
Gradiente di salinità	2000 TWh/anno
Gradiente termico	10000 Twh/anno

Le fonti di energia marina derivate dal vento, dalle onde, dalle maree o dalle correnti marine, possono essere utilizzate e convertite in potenza elettrica su larga scala. Le fonti commercialmente più praticabili finora studiate sono le correnti marine e il moto ondoso, che hanno comunque subito uno sviluppo commerciale limitato. Il contributo totale delle correnti marine e di marea combinate assieme, è di circa 5 TW su una scala globale di consumo di elettricità; mentre è di circa 1-10 TW quella del moto ondoso oceanico, che contiene una densità energetica per metro quadro 15-20 volte maggiore dell'eolico o del solare [2]. Le correnti marine sono prevedibili e possono essere sfruttate senza la necessità di costruire delle dighe, mentre il moto ondoso è di per sé meno prevedibile, derivando dall'energia eolica. La dissipazione delle maree sulle piattaforme continentali è di circa 2,5 TW; il 10% (0,25 TW) di questa fonte viene dissipata sulle coste del Regno Unito, che è ritenuto il leader mondiale nello sfruttamento delle fonti energetiche marine [3]. Se un decimo di questa somma fosse sfruttata per la generazione di potenza elettrica, la risorsa

energetica di corrente marina o di marea potrebbe fornire circa 220 TWh/anno, che corrisponde grossomodo alla metà del consumo odierno di energia elettrica del Regno Unito [4]. La maggior parte dell'energia contenuta nel moto ondoso viene dissipata in acque profonde, dove lo sfruttamento economico deve ancora essere economicamente dimostrato; vicino alle coste rimane comunque una risorsa pari a 1,3 TW su scala globale, secondo la stima dello European Thematic Network on Wave Energy, che corrisponde ad una quantità di energia tecnicamente sfruttabile pari a 100-800 TWh/anno. Sempre nel Regno Unito, che presenta un clima ondoso tra i più energetici al mondo, il potenziale energetico sfruttabile dal moto ondoso è pari a 50 TWh/anno [5]. Nei seguenti paragrafi si descrivono brevemente le caratteristiche principali delle quattro diverse risorse energetiche marine.

## **1.1 Moto ondoso**

Il moto ondoso è l'energia trasportata dal movimento dell'acqua vicino alla superficie del mare, in un processo oscillatorio o circolare, questa energia può essere convertita in elettricità. Le onde si formano in seguito al trasferimento di energia, risultato dal passaggio del vento sulla superficie del mare. La distanza lungo la quale si verifica questo fenomeno viene chiamata fetch; fetch più lunghi generano onde più larghe e più potenti, e sono causati da venti più forti e da periodi prolungati di vento. La dimensione delle onde generate dipende quindi dalla velocità del vento, dalla sua durata, e dalla distanza dell'acqua su cui soffia, il fetch appunto. Il movimento dell'acqua trasporta energia cinetica che può essere sfruttata in un impianto a moto ondoso. I parametri fisici che descrivono un'onda sono l'altezza, il periodo e la lunghezza. Il periodo e la lunghezza d'onda sono direttamente proporzionali alla sua velocità di propagazione.

### **1.1.1 Condizioni di sfruttamento**

In un bacino esteso come l'Oceano Atlantico, le onde provenienti da diverse origini si sovrappongono, e formano gruppi di onde che attraversano l'oceano quasi senza perdite di energia. Per le ragioni appena descritte le migliori risorse di onde si trovano in aree dove i venti forti hanno viaggiato per grandi distanze. In Europa quindi le condizioni migliori si verificano lungo le coste occidentali, che si trovano alla fine di un lungo fetch, l'Oceano Atlantico. Le onde, avvicinandosi alla costa, perdono energia a causa dell'attrito col fondale, perciò le onde in acque più profonde e ben esposte hanno la maggiore quantità di energia. Onde più regolari, con periodi quasi uguali che si ripetono in un arco di tempo lungo, comportano una migliore conversione dell'energia, rispetto alle condizioni del mare irregolari, poiché gli impianti a moto ondoso sono progettati

in base alla risonanza che è legata al periodo dell'onda. Considerando la latitudine e l'orientamento della linea costiera verso il mare, alcune nazioni sono più adatte allo sfruttamento del moto ondoso, mentre altre hanno un potenziale pressochè nullo nella fase iniziale di sviluppo. I paesi più adatti alla conversione dell'energia delle onde oceaniche sono la Gran Bretagna, l'Irlanda e la Norvegia, la Nuova Zelanda, l'Australia meridionale e il Cile, seguite dalla Spagna settentrionale, dalla Francia e dal Portogallo, infine si trovano anche le coste settentrionali e meridionali dell'America e il Sud Africa [6].

### 1.1.2 Stagionalità

A seconda dell'orientamento della linea costiera, in particolare per le isole, e delle principali condizioni del mare, le onde possono variare le condizioni in cui raggiungono le aree interessate. Ad esempio in Europa, lungo le coste del Portogallo, della Spagna e della Francia, l'intensità del moto ondoso nei mesi estivi può essere scarsa; per questa ragione la potenza media annuale delle onde può essere un parametro fuorviante quando usato per paragonare regioni diverse, se non si tiene in considerazione con esso anche il valore della variabilità stagionale. Una zona con potenza media annuale elevata può basarsi su brevi picchi di fenomeni ondosi ad elevata potenza, con effetti distruttivi non sfruttabili tecnologicamente, e da lunghi periodi a bassa intensità, con risorse pressochè non sfruttabili. Infine è essenziale che la periodicità non si mal contrapponga con la domanda di elettricità della regione se si vuole che questa risorsa sia un contributo importante all'elettricità immessa. E' necessario che una linea costiera sia idonea allo sfruttamento, per fare ciò, bisogna considerare le sue proprietà batimetriche, ovvero l'inclinazione e la forma del suo fondale. Le tecnologie per il moto ondoso, rispetto all'eolico offshore, non rappresentano in genere un problema di impatto visivo dalla costa, si preferisce perciò installare gli impianti il più vicino possibile alla terraferma, così da ridurre significativamente i costi dei cavi elettrici e di installazione; in secondo luogo la manutenzione può essere svolta più efficientemente. La profondità del mare più appropriata per il posizionamento di un impianto è di 50m, come compromesso tra l'energia disponibile, le spese di ormeggio e la distanza da terra[7]. Le regioni con una batimetria aspra, ovvero con fondali ripidi e acque profonde vicino alla costa, come il Portogallo, sono vantaggiose per l'impiego del moto ondoso. La maggior parte delle tecnologie sono galleggianti, quindi le condizioni del fondale non sono l'aspetto più critico, se si considera la posa dei cavi verso la terraferma, i fondali sabbiosi sono preferibili. Nei progetti su larga scala, l'ostacolo maggiore sarà la capacità e la disponibilità della rete di trasmissione, poiché le risorse di onde possono trovarsi in aree con una rete relativamente debole. Si rende necessario quindi uno sviluppo transnazionale della struttura a griglia sia onshore che offshore.

## 1.2 Maree

Le tecniche di conversione dell'energia di marea, sfruttano l'innalzamento e il calo naturale del livello del mare, dovuti principalmente all'interazione dei campi gravitazionali tra la Terra, la Luna e il Sole. I periodi principali di queste maree, sono giornalieri di circa 24 ore, e semidiurni di circa 12h 25min[8]. Le maree di plenilunio, si verificano quando le forze generatrici della Luna e del Sole agiscono nelle stesse direzioni, così la marea solare è sovrapposta a quella lunare. Un certo tipo di linea costiera, in modo particolare gli estuari, accentua questo fenomeno, creando delle escursioni di marea fino a 17 metri[8]. Le maree di quadratura invece, si verificano quando le forze generatrici del Sole e della Luna si trovano ad angolo retto tra di loro, in questo caso l'alta e la bassa marea sono ai loro minimi. I movimenti verticali dell'acqua, associati alla salita e alla discesa delle maree, sono accompagnati da movimenti quasi orizzontali dell'acqua, definiti correnti di marea. L'energia di marea, come risorsa sfruttabile deve essere distinta tra:

- Energia di escursione di marea: energia potenziale di una marea;
- Energia di corrente di marea: energia cinetica delle particelle dell'acqua in una marea.

Il potenziale energetico mondiale dell'oscillazione di marea è di circa 3 TW, di cui circa 1 TW disponibile in acque relativamente basse. Nell'Unione Europea, la Francia e il Regno Unito, presentano le più alte escursioni di marea di oltre dieci metri. Al di fuori dell'Unione Europea, il Canada, la Comunità degli Stati Indipendenti (CIS), l'Argentina, l'Australia occidentale e la Corea hanno siti potenzialmente interessanti [9].

### 1.2.1 Corrente di marea

Le correnti di marea hanno la stessa periodicità delle oscillazioni verticali, e sono perciò prevedibili, tendono però a seguire un percorso ellittico e non compiono un semplice movimento lineare; nel caso in cui vengano incanalate attraverso una topografia restrittiva, come uno stretto tra due isole, si possono manifestare velocità molto alte delle particelle d'acqua, fino a raggiungere dei picchi di 2 o 3 m/s durante le maree di plenilunio[10]. Le correnti di marea, mostrano solitamente la loro velocità massima in acque superficiali, accessibili per grandi lavori di ingegneria. Per la generazione di elettricità si sfrutta l'energia cinetica delle correnti in movimento, dentro e fuori dalle aree interessate dalla marea. La bassa marea ha spesso correnti un po' più grandi della marea crescente. La forza di questa risorsa dipende dalla posizione geografica del sito, dalla forma della linea costiera e dalla batimetria; sono quindi più grandi in aree dove la profondità del mare è relativamente bassa,



dove la velocità delle correnti è amplificata dall'effetto a imbuto della linea costiera e del fondale; come accade, per esempio, negli stretti e nei golfi, attorno ai promontori e nei canali tra le isole. Come per l'energia eolica, una legge cubica lega la potenza istantanea alla velocità del fluido. Una corrente marina di 2,5 m/s corrisponde ad un flusso di potenza di 8 kW/m<sup>2</sup>. La velocità minima per impieghi pratici è di 1 m/s, pari a 0,5 kW/m<sup>2</sup>[11]. Uno studio rilevante della Commissione Europea ha valutato la risorsa di corrente di marea per 206 siti in Europa, con caratteristiche adatte ad uno sfruttamento di questo tipo. La risorsa sfruttabile stimata è di 48 TWh/anno, con una capacità installata di turbine, maggiore di 12000 MW[12].



Figura 1.1 Rappresentazione grafica di un progetto subacqueo da 10MW in Scozia, fonte ScottishPower Renewables

### 1.2.2 Escursione di marea

L'energia potenziale delle maree può essere sfruttata attraverso lo sbarramento dell'acqua di mare dietro una diga o in una laguna. La potenza elettrica, viene prodotta quando l'acqua fluisce fuori e dentro lo sbarramento, attraverso delle turbine idroelettriche a bassa prevalenza. L'impianto può essere azionato sia con marea crescente, sia con bassa marea, o entrambe. Il metodo più comunemente usato è quello della generazione per riflusso (bassa marea); mentre la marea entra nel bacino formato dallo sbarramento, l'acqua scorre attraverso delle chiuse, che vengono poi serrate, e la marea inizia a rifluire. Quando il livello del mare, al di fuori della diga, è basso abbastanza da creare una prevalenza adeguata, le chiuse vengono aperte, e l'acqua defluisce nel mare attraverso le turbine. Il ciclo giornaliero di innalzamento ed abbassamento del livello del

mare, genera una prevalenza dell'acqua intrappolata nei bacini, di cui viene sfruttata l'energia potenziale. Questo tipo di tecnologia è più adatta in acque basse, con un'alta escursione di marea. Quest'ultime aumentano d'intensità in prossimità della costa; la topografia può ingrandire l'escursione; questo avviene soprattutto nei grandi estuari, a causa della pendenza del fondale e dell'incanalamento dell'acqua nell'estuario. In certi casi l'escursione di marea può aumentare per riflesso dell'onda di marea, a causa della costa, o per la risonanza di marea, che si può combinare all'effetto Coriolis e all'attrito. Questi fattori, comportano che l'escursione di marea possa variare notevolmente tra diversi punti lungo la stessa linea costiera. In Europa il fenomeno è particolarmente importante sulle coste occidentali, ovvero sulle coste occidentali dell'Inghilterra e della Scozia nel Regno Unito, e della Francia[13].

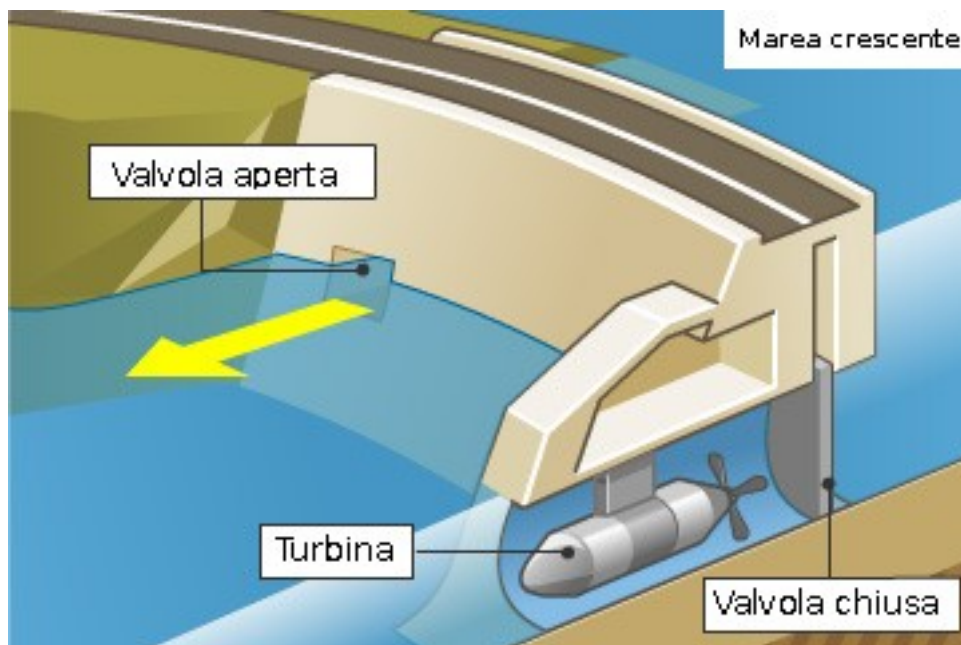


Figura 1.2 Rappresentazione del funzionamento di un impianto a barriera per lo sfruttamento delle maree, caso della marea crescente

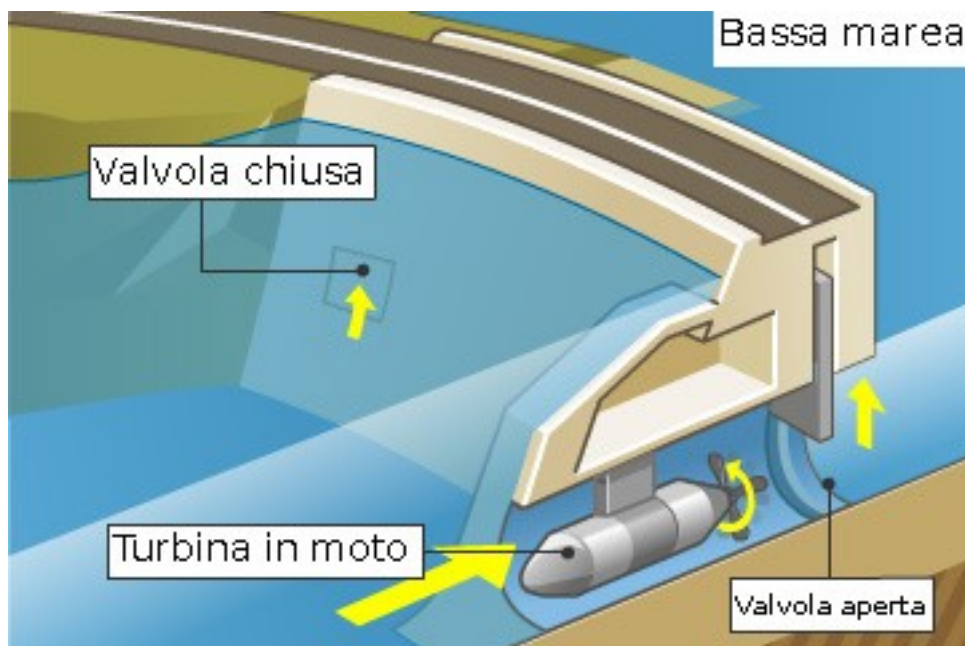


Figura 1.3 Rappresentazione del funzionamento di un impianto a barriera per lo sfruttamento delle maree, caso della bassa marea

### 1.3 Gradiente termico

L'energia talassotermica, anche conosciuta come OTEC, dall'inglese Ocean Thermal Energy Conversion (Conversione di energia termica oceanica), si basa sull'estrazione di energia dal gradiente termico, tra la temperatura dell'acqua di superficie più calda (22-27°C), e quella più profonda più fredda (4-7°C) [14], per mezzo di un ciclo termodinamico che produce potenza. Nella fascia di oceano compresa entro venti gradi dall'equatore, si può trovare una differenza di 20°C a un chilometro di profondità. Queste condizioni esistono nelle aree tropicali, grosso modo tra il Tropico del Capricorno e il Tropico del Cancro[15]. Con efficienze termodinamiche del 3%, i cicli OTEC devono compensare con grandi portate d'acqua marina di diversi metri cubi al secondo per megawatt di elettricità prodotta[16]. Considerando anche le grandi distanze lungo le quali l'acqua deve essere pompata, si hanno diverse difficoltà, oltre a quelle tipiche degli ambienti marini, per cui l'OTEC non riesce ancora ad essere economicamente competitivo. Gli impianti OTEC si differenziano in due categorie, a seconda della tipologia del ciclo termodinamico: quelli a ciclo aperto e a ciclo chiuso. Il primo si basa su una miscela di acqua salata e di bolle di vapore chiamata schiuma, formata in profondità, e spinta in salita al di sopra del livello del mare, così da essere separata, e da permettere all'acqua di espandersi nel rotore. Nel ciclo chiuso, l'acqua marina più calda, scalda un

fluido di lavoro con un basso punto d'ebollizione, come l'ammoniaca. Il vapore di questo fluido bassobollente si espande in una turbina, che aziona un generatore[17].

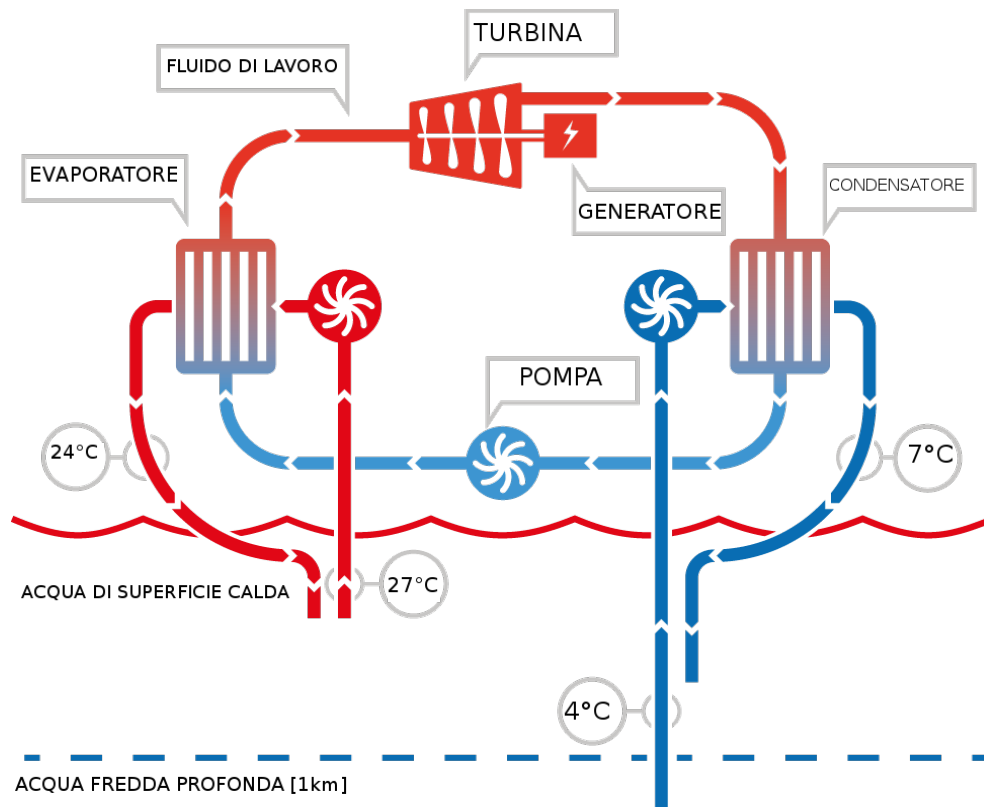


Figura 1.4. Schema del funzionamento di un ciclo OTEC chiuso. Fonte Bluerise

## 1.4 Gradiente salino

La tecnologia a cui ci si riferisce quando si parla di gradiente di salinità, sfrutta la differenza di pressione osmotica tra l'acqua dolce e quella salata. Il principio fisico si basa sullo sfruttamento dell'entropia di mescolanza tra due soluzioni con salinità diverse. Questo processo viene facilitato dall'uso di una membrana semipermeabile. Il gradiente di salinità è una fonte completamente rinnovabile, e meno periodica, se paragonata all'eolico o al solare. E' potenzialmente una delle risorse più grandi di energia rinnovabile del mondo. La sua produzione non è inquinante, ed è caratterizzata da emissioni non significative di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera[18]. Non sono conosciuti particolari ostacoli operativi, e per queste ragioni l'interesse per l'energia osmotica è cresciuta negli anni. Il potenziale globale per l'energia osmotica può corrispondere a metà di quello dell'idroelettrico convenzionale. Si stima che il potenziale in Norvegia sia

circa 12 TWh/anno, equivalenti al 10% del fabbisogno di energia elettrica del Paese. In Europa il potenziale equivalente è stimato 170 TWh/anno, mentre quello globale è nell'ordine di 1650 TWh/anno[19]. La potenza prodotta dagli estuari si stima ammonti a 2,6 TW, che rappresenta il 20% della domanda mondiale di elettricità[20]. Il lato negativo delle tecniche di conversione basate sulle membrane, era il costo elevato delle stesse. Oggi i prezzi in calo dovuti all'industria della desalinizzazione, e per le applicazioni di riuso dell'acqua, in aggiunta all'aumento dei prezzi dei combustibili fossili, rendono il gradiente salino attrattivo per il prossimo futuro[21]. Il costo capitale per un impianto di potenza a gradiente di salinità, sarà più alto se confrontato con quello eolico, ma d'altra parte l'impianto osmotico è progettato per operare a piena capacità quasi continuamente[22].

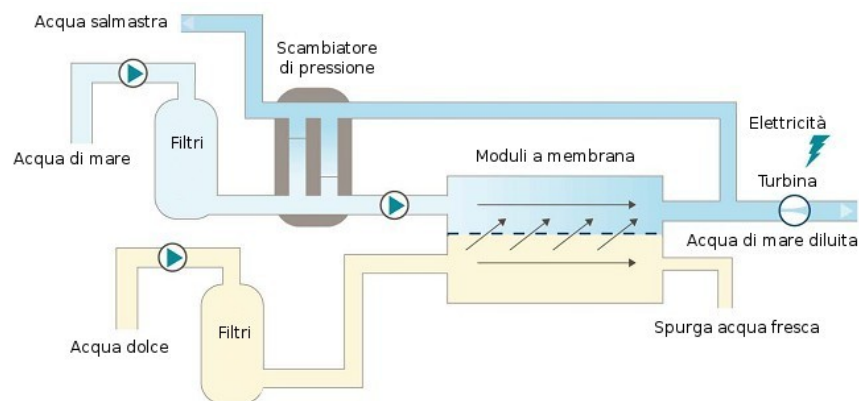


Figura 1.5. Ciclo di un impianto a gradiente di salinità a osmosi. Fonte: Statkraft

## 1.5 Corrente marina

Le correnti marine, a differenza di quelle di marea, scorrono in un'unica direzione e sono relativamente costanti. Sono dei sistemi circolatori imponenti e complessi. Alcune di esse operano su scala oceanica mentre altre, come la circolazione termoalina, scorrono attorno al mondo. Sono causate da diversi fattori tra cui l'effetto del vento sulla superficie dell'acqua, l'effetto della radiazione solare che scalda l'acqua nelle regioni equatoriali, l'effetto della variazione di salinità e di densità, e infine l'effetto della rotazione terrestre. Le correnti spinte dal vento, interessano le acque oceaniche di superficie fino a 600-800 m di profondità. Le correnti causate da gradienti salini e termici, sono normalmente lente e profonde, ed hanno inizio nelle acque ghiacciate attorno al Polo Nord. Le correnti spinte dal vento, sono in genere meno adatte allo

sfruttamento energetico, rispetto a quelle di marea, perchè sono più lente. Esempi di queste correnti sono la corrente nord-atlantica, la corrente del Golfo e la corrente degli stretti della Florida. In Europa siti con correnti sufficientemente intense, si trovano attorno alle isole britanniche e all'Irlanda, tra le Channel Islands e la Francia, nello Stretto di Messina tra la Sicilia e la Calabria, e in diversi canali tra le isole dell'Egeo. Come con le correnti di marea, è possibile estrarre energia per azionare delle turbine sottomarine, e produrre elettricità. Ad esempio, il flusso di potenza della corrente degli stretti della Florida, ammonta a  $1 \text{ kW/m}^2$ . L'impatto ambientale deve essere preso in considerazione; per esempio possono verificarsi effetti sui mammiferi marini, dovuti alle pale rotanti delle turbine. Su scala globale, il rallentamento delle correnti per conversione dell'energia cinetica in elettricità, potrebbe avere un effetto maggiore, in quanto l'influenza sul clima è risaputa.

## Capitolo 2

### Energia delle onde

Le onde sono generate dal vento, che scorre sulla superficie del mare. Finché la velocità di propagazione delle onde è più lenta di quella del vento, che soffia su di esse, si ha un trasferimento di energia dal vento alle onde. In questo processo concorrono due fattori: la differenza di pressione dell'aria, tra il lato sopravvento e il lato sottovento dell'onda, in aggiunta all'attrito tra il vento e la superficie dell'acqua; questi provocano uno sforzo tangenziale, che causa lo sviluppo delle onde. L'altezza delle onde è determinata dalla velocità del vento, dalla durata del tempo in cui esso ha soffiato, dal fetch, dalla profondità e dalla topografia del fondale marino. Assegnata una certa velocità del vento, si ha un limite fisico di tempo o di distanza, oltre i quali non vengono generate onde più grandi. In tal caso il mare viene detto “completamente sviluppato”.

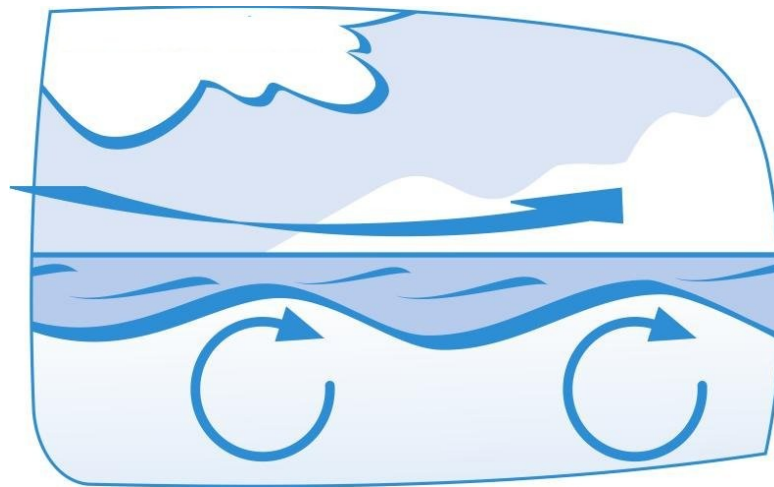


Figura 2.1. Grafica del passaggio di energia dal vento alle onde. Fonte Aquaret

#### 2.1 Fisica delle onde

Le onde sono caratterizzate da tre importanti grandezze:

- L'ampiezza  $A$  [m] è l'altezza della cresta o del cavo;
- La lunghezza d'onda  $\lambda$  [m] è la distanza tra due picchi o cavi consecutivi;
- La frequenza  $f$  [1/s] è il numero di onde che passano in un secondo.

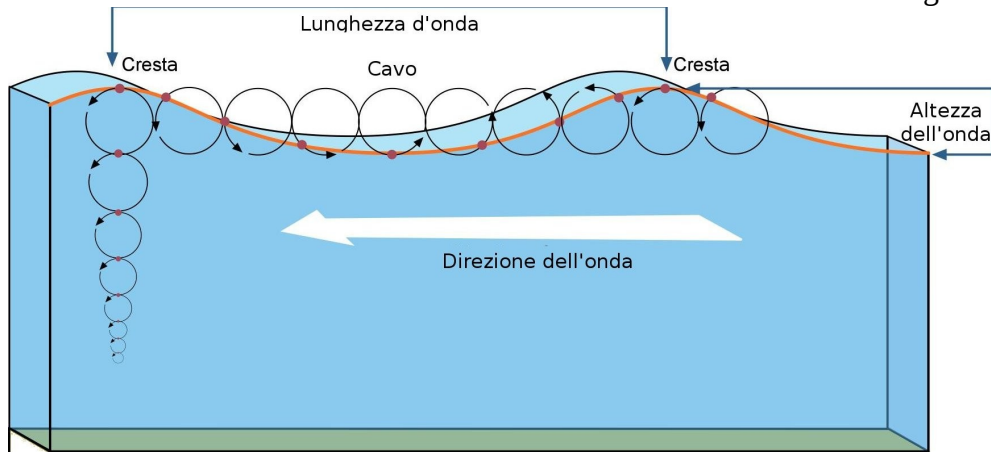


Figura 2.2 Grafica dei parametri significativi di un'onda. Fonte Aquaret

L'onda può essere fisicamente descritta dalla sua lunghezza  $\lambda$ , e dall'altezza  $H$ , definita come doppia ampiezza:  $H=2A$ . Per descriverne il comportamento più accuratamente, possono essere applicate diverse teorie delle onde, in dipendenza della profondità e dell'inclinazione dell'onda. Per le acque profonde, definite come  $\lambda < 0.5h$ , dove  $h$  è la profondità del mare, il 95% dell'energia delle onde è disponibile tra la superficie e la profondità  $h=\lambda/4$ . Le particelle dell'acqua si muovono con un percorso oscillante, e l'ampiezza dei cerchi diminuisce esponenzialmente con la profondità. In questo caso può essere applicata la teoria dell'onda lineare sviluppata da Airy (1845). Se le onde diventano profonde, e quindi il rapporto tra la lunghezza d'onda e l'altezza dell'onda è piccolo, la teoria dell'onda lineare non è più valida, e si usa la teoria di Stokes di second'ordine. In acque basse infine, le particelle nelle onde si muovono in un percorso ellittico, ed è preferibile usare la teoria delle onde solitarie[1]. In questo capitolo si considera il caso di onde oceaniche in acque profonde, campo in cui la ricerca tecnologica si è maggiormente sviluppata. Le onde contengono due forme di energia: l'energia cinetica delle particelle d'acqua, che seguono un percorso circolare, e l'energia potenziale delle particelle d'acqua elevate. In media l'energia cinetica in un'onda lineare equivale a quella potenziale. L'energia di uno stato reale del mare, è misurata attraverso dei parametri statistici delle onde: l'altezza e il periodo. L'energia media di una certa condizione del mare caratterizzata da  $H$  è stimata dalla formula[2]:

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \quad (2.1)$$

Dove:

- $E$  [ $\text{J}/\text{m}^2$ ] è l'energia totale del moto ondoso continuo nell'acqua profonda (cinetica e potenziale) in un mare in movimento;
- $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] è la densità dell'acqua di mare;
- $g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] è l'accelerazione di gravità;
- $H_s$  [ $\text{m}$ ] è l'altezza significativa dell'onda;
- $T$  [ $\text{s}$ ] è il periodo dell'onda.



L'altezza significativa è l'altezza media del terzo più alto delle onde di un certo periodo, in genere 30 minuti, e corrisponde grossomodo a quello che stimerebbero dei marinai esperti[3]. Questa misura standard dell'industria offshore, si calcola nel seguente modo: le onde di un campionamento vengono contate e selezionate in ordine discendente partendo dall'onda più alta fino a raggiungere un terzo del numero totale di onde. Il valore medio è  $H_{1/3}$ . La stessa procedura potrebbe essere applicata al periodo dell'onda, risultante in  $T_{1/3}$ , il periodo significativo dell'onda. In generale, le onde più grandi sono anche le più potenti, ma il moto ondoso è anche determinato dalla velocità dell'onda, dalla lunghezza d'onda e dalla densità dell'acqua. La potenza media trasportata dal moto ondoso attraverso un piano verticale di spessore unitario, parallelo alla cresta dell'onda, è definito come flusso di energia dell'onda, o potenza dell'onda, da non confondersi con la potenza effettiva generata da un impianto a moto ondoso. La potenza  $P$  per unità di larghezza del fronte d'onda è data da[4]:

$$P = \frac{1}{64} \frac{\rho g^2}{\pi} H_s^2 T_e \quad (2.2)$$

Dove :

- $P$  è espresso in [W/m];
- $H_s$  [m] è l'altezza significativa dell'onda ;
- $T_e$  [s] è il periodo significativo dell'onda.

Si evince, che la potenza dell'onda è proporzionale al periodo dell'onda, e al quadrato dell'altezza significativa dell'onda. Stimare il contenuto energetico di un certo stato del mare, è molto importante sia per la caratterizzazione del sito in esame, sia per predire le prestazioni di un impianto a moto ondoso. Un'onda in acque profonde viaggia alla velocità di fase  $v_p$  definita come[5]:

$$v_p = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (2.3)$$

Un gruppo di onde viaggia invece alla velocità di gruppo  $v_g$ :

$$v_g = \frac{1}{2} v_p \quad (2.4)$$

Le onde si propagano sulla superficie del mare, e l'energia viene trasportata orizzontalmente con la velocità di gruppo.

## 2.2 Fenomenologia delle onde

Tra i diversi tipi di onde oceaniche, quelle generate dal vento sono le più energetiche. Esse derivano dai venti mentre soffiano sull'oceano, come sottoprodotto della redistribuzione atmosferica dell'energia solare. Il tasso di contributo energetico alle onde è compreso tra  $0.01 \text{ W/m}^2$  e  $0.1 \text{ W/m}^2$ [6]. Questa è una piccola frazione dell'apporto energetico solare lordo, che si attesta su una media di  $350 \text{ W/m}^2$ [7]. Le onde però, possono crescere lungo distanze oceaniche, fino a raggiungere densità energetiche, con medie superiori ai  $100 \text{ kW/m}^2$ [8]. Questo trasferimento di energia, fornisce un immagazzinamento naturale di energia eolica nell'acqua vicino alla superficie. Una volta create, le onde possono viaggiare per migliaia di chilometri con piccole perdite di energia, a meno di incontrare venti contrari. Avvicinandosi alla costa, l'intensità energetica diminuisce a causa dell'interazione col fondale marino; questa dissipazione può essere compensata da fenomeni naturali, quali la rifrazione o la riflessione, dovuta alla topografia del sito, che portano ad una concentrazione dell'energia. I siti in cui avviene questo fenomeno, vengono definiti in letteratura "hotspot" (punti caldi).

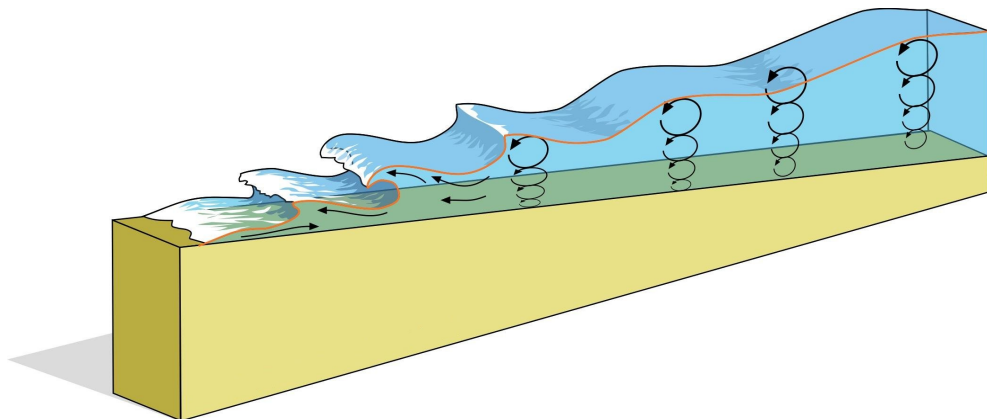


Figura 2.3. Fenomeno di dissipazione e rottura ultima dell'onda in avvicinamento sulla costa. Fonte Aquaret

Quando la velocità del vento cala, le onde si dividono; diminuisce di conseguenza l'inclinazione, assieme al tasso di perdite di energia, fintantoché rimangono in acque profonde. Queste onde, private della fonte che le ha generate, sono conosciute come "mare lungo" (in inglese swell). Uno stato di mare reale, è composto da un insieme di diverse componenti spettrali: un mare localmente interessato dal vento, sommato a uno o più componenti di mare lungo. Esse si comportano in maniera cumulativa, sia per quanto riguarda la frequenza, sia per i flussi energetici. Quando le onde oceaniche entrano in acque basse, definite come  $h < 0.5\lambda$ , esse cambiano in diversi aspetti. Come già anticipato nel paragrafo 2.1, le soluzioni delle equazioni per le onde di superficie sono diverse. Per esempio se la lunghezza d'onda è molto più grande

della profondità dell'acqua, la velocità di gruppo è non più metà, vedi eq. (2.4), ma è la stessa[9]. Ciò significa che le onde non sono più dispersive ma viaggiano insieme. Un classico esempio è lo tsunami, in cui un'onda di lunghezza maggiore di 100km, viene generata da una salita o discesa improvvisa del fondale. Quando entrano in acque basse, le onde oceaniche rallentano, la loro lunghezza decresce, e l'altezza aumenta fino alla rottura. Esse perdono energia, sia attraverso la rottura, sia per attrito col fondale marino.

## 2.3 Risorsa globale

A causa delle origini eoliche, le medie più alte di potenza delle onde oceaniche, si trovano nel lato sottovento degli oceani a fascia temperata. La stima della risorsa è cruciale quando si selezionano i siti adatti. Il progetto WorldWaves, finanziato dall'Unione Europea, ha integrato i dati satellitari altimetrici, e quelli misurati dalle boe, per ricavare un database globale di alta qualità delle onde e del vento. Dieci anni di dati basati su sei onde all'ora, e su parametri legati al vento, sono stati ricavati per 10000 siti offshore, su una griglia globale con un reticolo intervallato a  $0.5^\circ$ . Con questo set di dati, sono state prodotte diverse mappe del globo, che vengono utilizzate quando si parla di risorsa energetica globale delle onde.

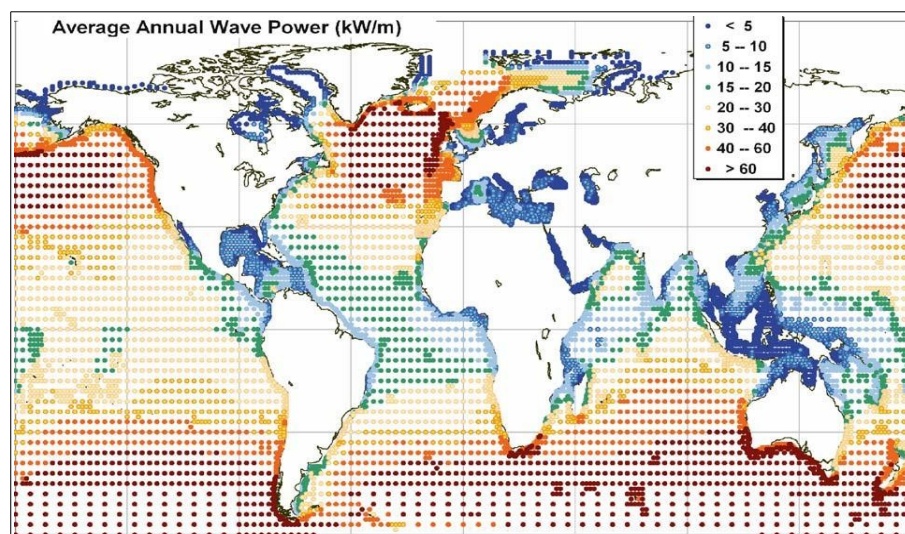


Figura 2.3 Stima della potenza globale annuale media delle onde in kW/m

La figura 2.3. rappresenta la mappa della potenza media annuale delle onde su dieci anni, per tutti i punti del globo del database del WorldWaves. Essa mostra chiaramente, che le aree energeticamente più ricche al mondo, sono situate nelle fasce temperate tra le medie e le alte latitudini di entrambi gli emisferi, in particolare tra i  $40^\circ$  e i  $60^\circ$ .

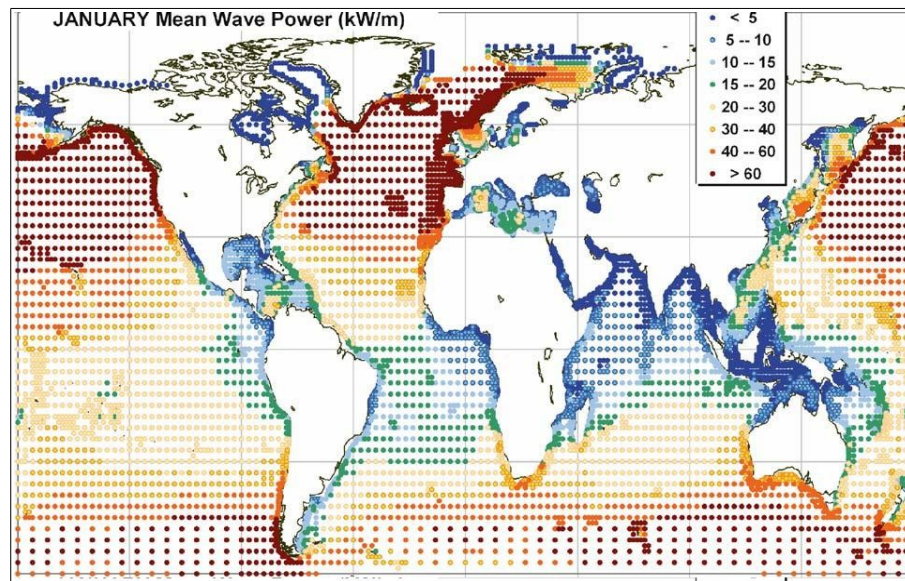


Figura 2.4. Stima della potenza media globale delle onde di Gennaio in kW/m

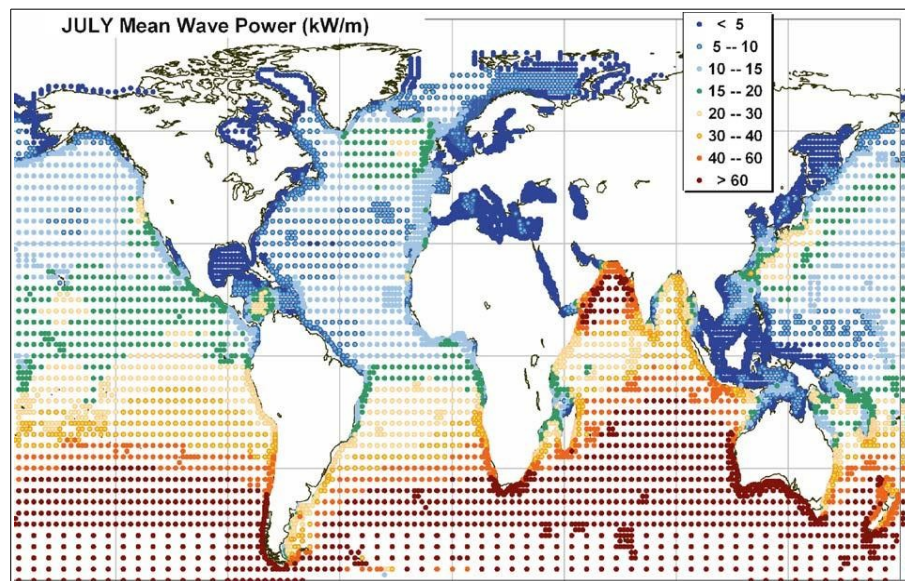


Figura 2.5. Stime della potenza media globale delle onde di Luglio in kW/m

La mappa della fig.2.3, dà comunque un'idea relativamente sbagliata, dei livelli di energia, in entrambi gli emisferi. Le maggiori risorse dell'emisfero meridionale, dove le variazioni stagionali sono più basse (si confronti la figura 2.4 e 2.5, che mostrano le medie di Gennaio e Luglio), si osservano meglio nella figura 2.6, dove è riportata la potenza media delle onde, in tutti i punti della griglia in funzione della latitudine, sia quella annuale, sia quella mensile di



Gennaio e Luglio. Le figure 2.4 e 2.5 danno quindi un'idea sulla stagionalità delle risorse globali.

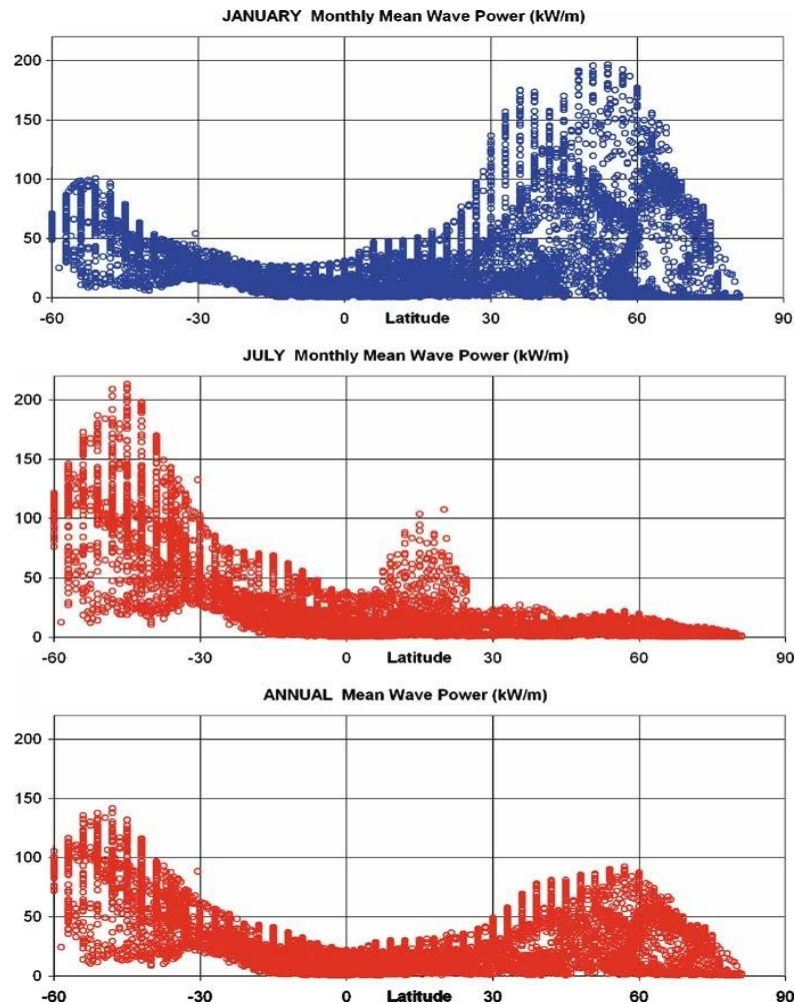


Figura 2.6. Variazione della potenza media mensile e annuale delle onde rispetto alla latitudine per tutti i punti della griglia

Le risorse più importanti si trovano nell'emisfero meridionale, dove le variazioni stagionali sono più basse. Su base annuale, i livelli più alti dell'emisfero settentrionale sono al largo della costa occidentale delle isole britanniche (si osservi la fig.2.7), dell'Islanda e della Groenlandia, con livelli un po' più bassi nel Pacifico, al largo del litorale occidentale degli Stati Uniti e del Canada.

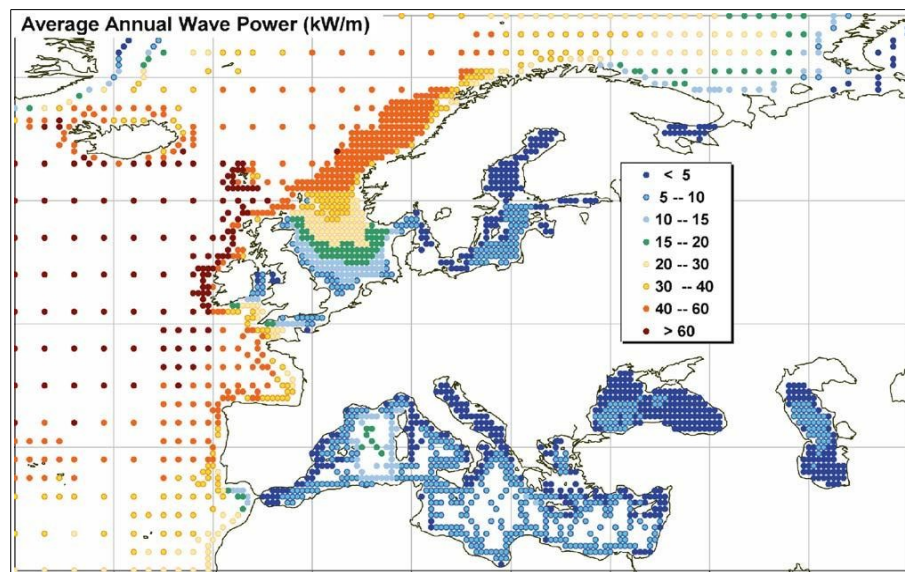


Figura 2.7. Stime della potenza media annuale delle onde in kW/m in acque europee

I livelli più alti di energia offshore, complessivamente di profondità tra i 50 e i 100 m nell'emisfero meridionale, si trovano al largo del Cile meridionale, Sud Africa, e dell'intera costa sud e sud-ovest dell'Australia e della Nuova Zelanda. Nelle acque equatoriali si osservano livelli di potenza su base annuale di 15-20 kW/m in tutti i punti dei bacini oceanici. Le risorse costiere più grandi, sono al largo del Perù e dell'Equador, nonostante potrebbe esserci in quest'area, una significativa variabilità intra annuale indotta da El-Nino. Infine, nelle latitudini medie, l'Australia occidentale sembra essere la più energetica, assieme alla California, con una risorsa relativamente alta per questa latitudine. Il valore più elevato di potenza al mondo, si trova nell'oceano meridionale, a circa  $48^{\circ}\text{S}$ ,  $90^{\circ}\text{E}$ , che è circa 1400 km a est dell'isola Kerguelen[10]. Qui, la media annuale supera i 140 kW/m. Nell'emisfero settentrionale, il massimo si trova a  $57^{\circ}\text{N}$ ,  $21^{\circ}\text{W}$ , circa 400 km ovest di Rockall[11]. Qui si hanno 90 kW/m relativamente più bassi. Il livello massimo di potenza globale mensile è praticamente lo stesso nei due emisferi, a poco più di 200 kW/m. Si noti che queste posizioni sono indicate come un esempio, e sono ovviamente inadatte per progetti di sfruttamento del moto ondoso: la mera distanza dalla costa, e la profondità, sono sufficienti per renderle poco attraenti. Si stima che la prima centrale a moto ondoso, sarà dislocata in aree con profondità di 50-60 m, ovvero nel limite di transizione tra il nearshore e i climi più convenienti dell'offshore[12]. Comunque, se si valuta il tasso del livello di potenza minimo mensile, contro la media annuale, si ottiene un'idea più chiara di come la risorsa vari lungo l'anno. A questo scopo si osservi la figura 2.8.

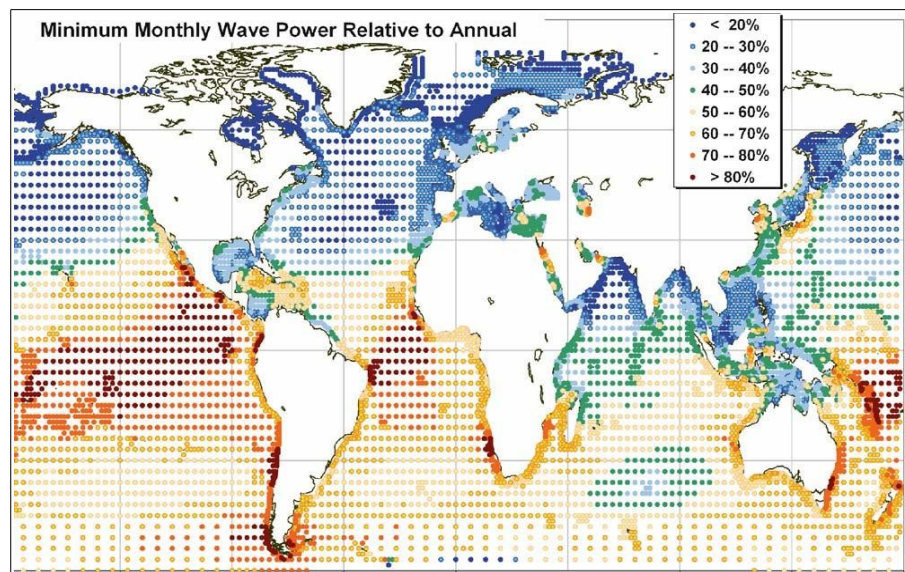


Figura 2.8. Rapporto tra il minimo dei valori della potenza media mensile delle onde, e il valore annuale. Dà un'indicazione della variabilità stagionale della risorsa

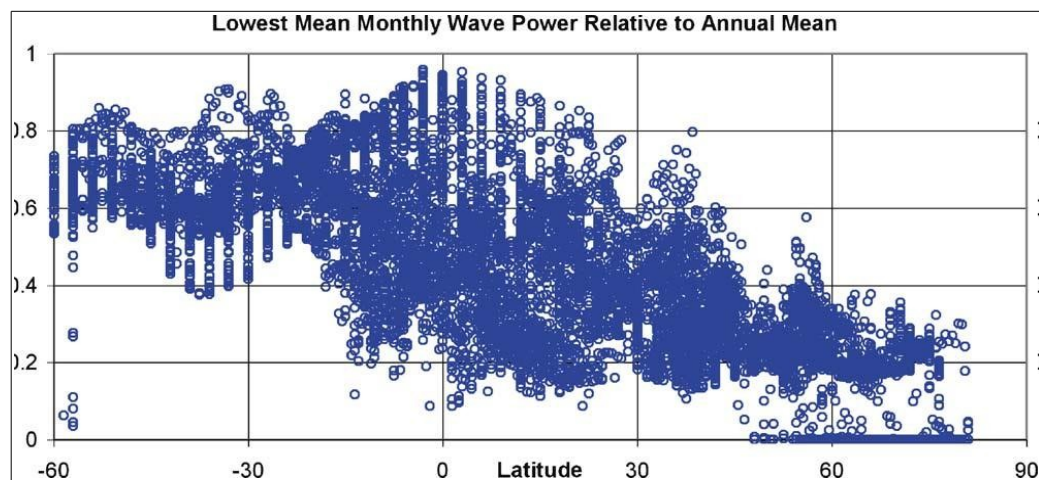


Figura 2.9. Variazione del rapporto del minimo dei valori della potenza media mensile col valore annuale rispetto alla latitudine

La figura 2.9 rappresenta i dati in maniera differente rispetto alla fig.2.8. Relazionando l'andamento dei dati alla latitudine, essa mostra chiaramente la minore stagionalità nel sud. Si noti che, i punti della griglia con valore nullo, si trovano in aree a contatto col ghiaccio nell'emisfero settentrionale. C'è una differenza notevole tra i due emisferi per quanto riguarda la stabilità delle risorse. Si hanno grandi cambiamenti estivi ed invernali nel nord, essendo le più grandi situate nelle acque a ridosso del ghiaccio artico. Ci sono anche grandi



cambiamenti stagionali nell'area dei monsoni dell'Asia sudorientale, a causa del cambiamento stagionale nella direzione del vento. Questo fenomeno di stagionalità è particolarmente forte lungo le coste stagionalmente sottovento e sopravvento, o anche lungo i due lati opposti di un'isola oceanica, a causa dell'influenza del fetch sulla crescita dell'onda. Nel mare della Cina del sud, la stagionalità è elevata a causa del fatto che c'è poco mare lungo (onde che si propagano oltre la zona in cui il vento le ha generate) per spianare i cambiamenti del mare dovuti al vento stagionale. Questa è anche una caratteristica dominante del mare d'Arabia che, con la Baia del Bengala, sono le uniche aree di mare nell'emisfero settentrionale, con livelli di energia in estate più grandi dell'inverno, a causa di una combinazione di venti monsonici estivi più forti, e di un maggior influsso del mare lungo in quel periodo dell'anno, ovvero l'inverno dell'oceano meridionale. Un'altra caratteristica interessante è l'area dell'Oceano Indiano meridionale, a sud e a ovest dell'Australia, che mostra stagionalità regionali sorprendentemente grandi. Questo è dovuto al fatto che quest'area è influenzata, in Gennaio, dall'anticiclone dell'Oceano indiano. Questo ha un dislocamento stagionale importante verso ovest, durante l'inverno, inducendo un grande cambiamento stagionale nella frequenza delle tempeste dell'area suddetta. Nelle zone costiere, sono presenti risorse di energia delle onde particolarmente stabili al largo del Cile, della Namibia, dell'Australia orientale, della Sierra Leone, della Liberia, delle coste del Pacifico del Messico, e della maggior parte delle nazioni delle isole del Pacifico meridionale; nonostante questi Paesi, particolarmente quelli che si trovano ad un livello più basso, siano ora preoccupati dal potere delle onde per altre ragioni.

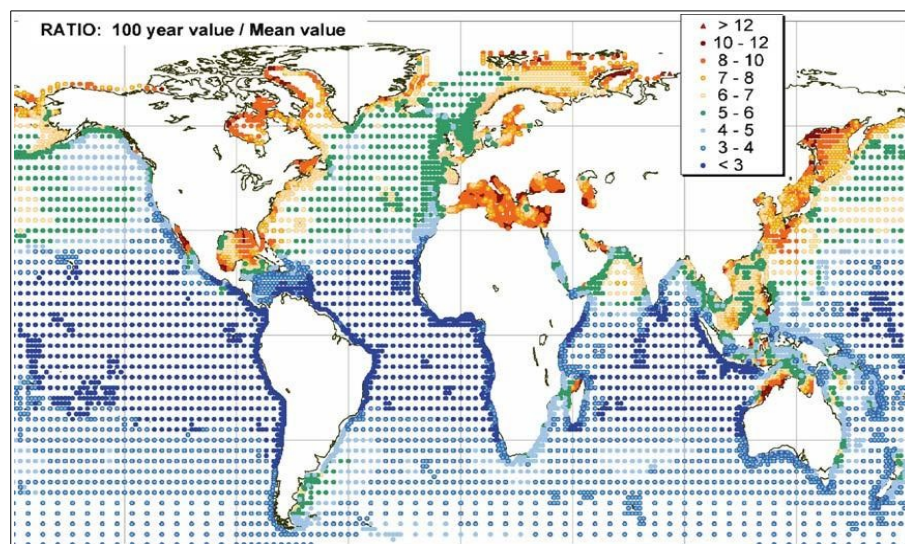


Figura 2.10. Rapporto tra l'altezza significativa in 100 anni, e l'altezza media delle onde.



La fig.2.10 traccia la relazione tra l'altezza dell'onda significativa estrema e media. Essa riflette grossomodo il rapporto tra i costi di progetto per un impianto a moto ondoso, e la sua rendita (la risorsa). Più è basso questo rapporto, meglio è. Il valore sui 100 anni, è calcolato da una semplice estrapolazione della distribuzione dell'altezza significativa in 10 anni, in ogni posizione, adeguato a una distribuzione Weibull a 3 parametri. Si consideri il rapporto tra l'altezza significativa media ed estrema delle onde. Uno può considerare, in termini molto semplici, che più basso è questo rapporto, più fattibile potrebbe essere un progetto di moto ondoso. Le condizioni estreme si riferiscono al progetto e all'ammontare dei costi operativi, la media invece rappresenta la risorsa, ovvero il reddito. La variazione di questo rapporto, dall'acqua profonda all'acqua bassa, è particolarmente interessante. In termini di risorse, quando si cerca un sito adatto all'installazione di un impianto a moto ondoso, si trovano molte aree attraenti. La sfida sta nello scegliere una posizione, che fornisca non solo la risorsa adeguata, ma anche tutte le condizioni necessarie che assicurino un'operazione continua e affidabile dell'impianto. Un fattore guida è la prossimità alla costa, legato anche alla profondità dell'acqua, siccome influenza non solo i costi (e.g. Cavi elettrici sottomarini), ma principalmente la possibilità di recuperare gli apparecchi in maniera sicura, e di condurre la manutenzione nel cantiere navale locale. Tutte queste variabili (risorsa, costo, O&M) necessitano di essere accuratamente misurate e ponderate.



## Capitolo 3

### Classificazione delle tecnologie di conversione

Per sfruttare l'energia contenuta nelle onde del mare son state sviluppate numerose tecnologie anche molto diverse tra di loro. La ricerca in questo campo ha origini non tanto recenti, ma è stata discontinua fino ai giorni nostri. In questo capitolo si fa un excursus della storia della ricerca e si descrivono i principi di classificazione delle tecnologie.

#### 3.1 Gli albori della ricerca

L'idea di convertire l'energia delle onde superficiali in forme utili di energia non è recente. Il primo brevetto, noto per usare l'energia delle onde dell'oceano, risale al 1799, e fu archiviato a Parigi da Girard e suo figlio[1]. Sempre in Francia, nel 1910, ci fu una prematura applicazione, volta ad illuminare e ad alimentare la casa di Bochaux-Praceique, vicino a Bordeaux[2]. Questo dispositivo sembra essere del tipo a colonna d'acqua oscillante.

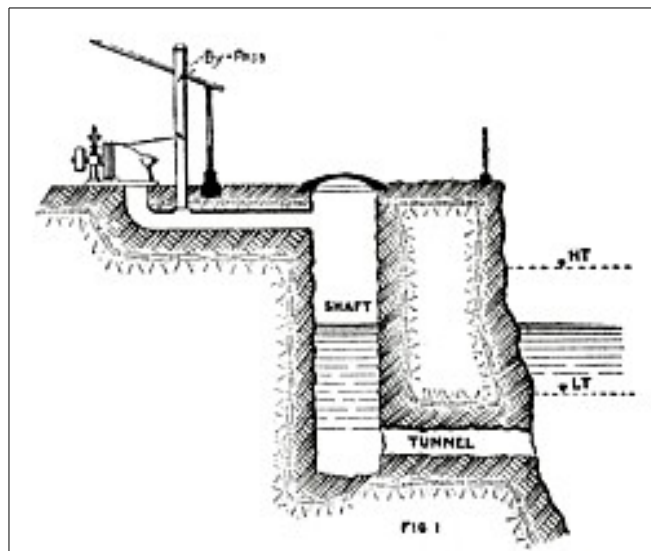


Figura 3.1. Progetto dell'impianto di Bochaux-Praceique

Dal 1855 al 1973 solo in Gran Bretagna furono registrati 340 brevetti. Il primo, a compiere una ricerca approfondita con numerosi esperimenti, fu il giapponese Yoshio Masuda negli anni '40 del ventesimo secolo[3]. Egli testò nel mare varie idee di dispositivi a moto ondoso, producendo centinaia di unità utilizzate per alimentare le luci di navigazione. Tra queste ci fu anche l'idea di estrarre potenza dal movimento angolare dei giunti di una zattera articolata, che fu proposta negli anni 50. Masuda sviluppò una boa per la navigazione alimentata dal moto ondoso, equipaggiata con una turbina ad aria, che fu poi chiamata colonna d'acqua oscillante, acronimo OWC dall'inglese Oscillating Water Column[4].

Nel 1973 ci fu un interesse rinnovato per il moto ondoso, a causa della crisi petrolifera. Molti ricercatori riesaminarono il potenziale di generare elettricità dalle onde oceaniche. Si ricordi Shalter Salter dell'università di Edimburgo, la cui invenzione, del 1974, divenne conosciuta come l'anatra di Salter o anatra oscillante, che venne poi ribattezzata come “anatra di Edimburgo”. In piccoli test su scala ridotta, il corpo curvo a forma di camma di anatra può fermare il 90% del movimento dell'onda, convertendo il 90% di questo in elettricità, con un'efficienza complessiva dell'81%[5].

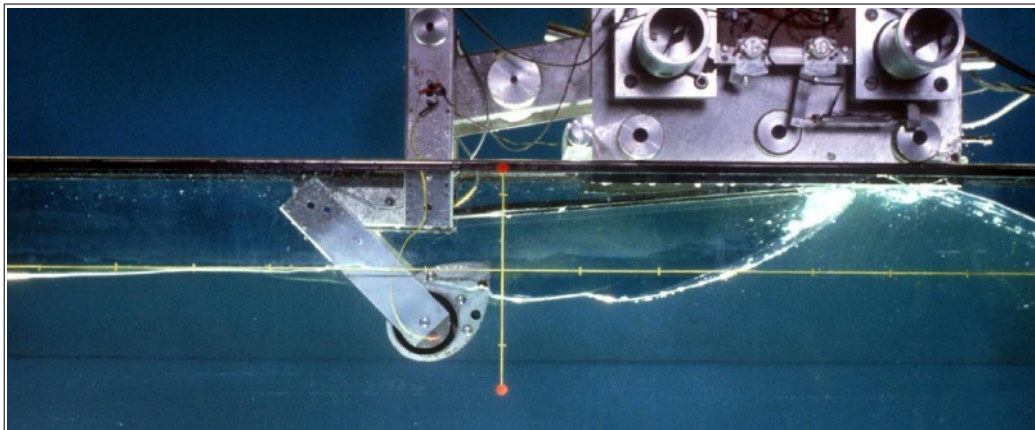


Figura 3.2. Anatra di Salter in un esperimento di laboratorio

Si noti nella fig.3.2 come, l'energia dell'onda in arrivo da destra, venga completamente convertita dal dispositivo galleggiante. L'assorbimento del moto ondoso è un processo idrodinamico di considerevole difficoltà teorica, nel quale hanno luogo fenomeni relativamente complessi di diffrazione e di radiazione delle onde. Questo spiega perchè la maggior parte del lavoro negli anni settanta sia stato incentrato sullo sviluppo teorico idrodinamico. Negli anni ottanta, in seguito al calo del prezzo del petrolio, l'interesse e il finanziamento per il moto ondoso venne meno, riducendosi drasticamente. Solo recentemente, in seguito ai problemi del cambiamento climatico, è cresciuto un nuovo interesse per l'energia rinnovabile in tutto il mondo, incluso il moto ondoso.

### **3.2 Storia recente della ricerca**

La quantità di ricerca e sviluppo sul moto ondoso è molto ampia. In Europa gli sforzi della ricerca hanno trovato il supporto della Commissione Europea, che sin dal 1986 ha osservato l'evoluzione nel campo del moto ondoso. I cui programmi di ricerca iniziarono effettivamente col quarto programma quadro nel 1994[6]. Due studi hanno posto le basi alla possibilità di estrarre energia dalle onde del mare e delle correnti marine: l' Atlas of Wave Energy Resource in Europa (atlante della risorsa del moto ondoso in Europa) del 1996, e l' Exploitation of tidal and marine currents (sfruttamento delle correnti marine e di marea) sempre del 1996[7]. La Commissione finanziò i progetti, che avrebbero comprovato la fattibilità tecnica di questo tipo di estrazione di energia. Si ebbero così costruiti gli impianti pilota Pico e Limpet, tuttora in funzione. Oggi, diversi progetti hanno provato la loro applicabilità su larga scala in dure condizioni operative, e alcuni impianti commerciali sono in costruzione in diverse parti del mondo. E' tuttavia richiesto un continuo apporto di ricerca e di sviluppo per migliorare le prestazioni tecnologiche di conversione, e per stabilire la loro competitività nel mercato energetico globale.

### **3.3 Classificazione dei convertitori**

In letteratura i dispositivi per la conversione del moto ondoso vengono denominati WEC, acronimo di Wave Energy Converter (Convertitore di energia delle onde). E' stato sviluppato un numero elevato di tecnologie per lo sfruttamento dell'energia delle onde; in tutto il mondo sono stati registrati più di mille brevetti, ma nessuna di queste tecnologie si è ancora imposta come quella dominante. Una classificazione univoca sarebbe quindi inappropriata. I tre parametri più usati per distinguere le diverse tecnologie sono:

- Posizione rispetto alla costa;
- Principio di funzionamento;
- Sistema di Power Take-off.

### **3.4 Posizione rispetto alla costa**

Questo principio di differenziazione, suddivide i WEC in base alla lontananza dalla costa in tre categorie: dispositivi onshore (sulla costa), nearshore (vicino alla costa) e offshore (lontano dalla costa).

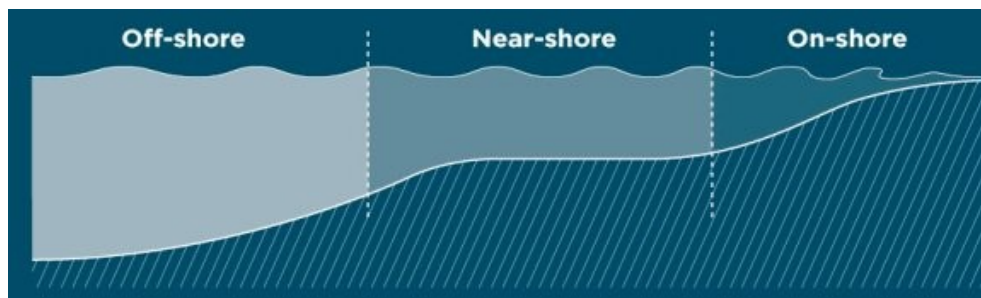


Figura 3.3. Sezione di un profilo costiero, suddivisa nelle tre categorie: onshore, nearshore e offshore. Fonte AWenergy

### 3.4.1 Dispositivi onshore

I dispositivi onshore possono essere installati sul fondale marino in acque basse, o essere integrati in strutture frangiflutti o su scogliere rocciose. La scelta della posizione, per i dispositivi a moto ondoso in acque basse, rappresenta la difficoltà più grande. Il clima ondoso è molto sensibile alla batimetria locale, e alla geometria della costa. Le escursioni di marea possono essere un problema. In certe aree, definite “hotspot”, la giusta combinazione di acqua bassa e di conformazione del fondale marino, può favorire una notevole concentrazione di energia ondosa, per rifrazione, diffrazione o riflessione, compensando pertanto un ambiente altrimenti debole. In altri siti costieri d'altra parte, possono verificarsi dei fenomeni dissipativi. In acque basse inoltre, le onde più grandi possono rompersi e perdere energia ancor prima di raggiungere il dispositivo. Oltre a ciò, a seconda delle caratteristiche della posizione, possono esserci dei requisiti specifici che riguardano la geometria della costa, la geologia e la preservazione del paesaggio, perciò i dispositivi non possono essere progettati per la fabbricazione di massa. I vantaggi maggiori dei WEC onshore, rimangono nella più facile installazione dell'impianto, in condizioni ambientali più sicure, costi di manutenzione ridotti, vicinanza alla rete elettrica, assenza di ormeggi in acque profonde, e necessità di cavi elettrici sottomarini più corti.

### 3.4.2 Dispositivi nearshore

I dispositivi nearshore, sono pensati per un impiego in acque profonde approssimativamente tra i 10 e i 20 metri, e da centinaia di metri fino a qualche chilometro lontano dalla costa. Profondità d'acqua così moderate sono adatte per grandi dispositivi posti sul fondale. La scelta del nearshore, è dovuta innanzitutto per ovviare i problemi descritti dell' onshore, e per evitare gli ormeggi. I WEC, con una struttura installata sul fondale marino, possono sfruttare il moto ondoso in pieno, questa capacità non è propria dei dispositivi galleggianti. Rappresentano quindi un compromesso interessante. I problemi

maggiori consistono nei carichi ondosi estremi, a cui una grande struttura fissa deve resistere, e nei costi per unità di dispositivo.

### **3.4.3 Dispositivi offshore**

I dispositivi offshore rappresentano la più promettente categoria di convertitori a moto ondoso. Sono ancorati al fondale marino in acque profonde, solitamente oltre i 49 metri di profondità, e possono essere galleggianti o sommersi. Questi apparecchi possono sfruttare l'enorme potenziale del mare aperto. Nel passato, il loro sviluppo è stato ritardato o limitato, perchè le tecnologie richieste erano inaffidabili o troppo costose. E' richiesta un'elevata affidabilità, per evitare eccessivi costi legati alla manutenzione. La potenza ondosa delle tempeste più forti, in mare aperto, può arrivare fino a 1 MW/m, ma comunque in quel caso i dispositivi sarebbero disattivati. A causa dell'estrema inclemenza dell'ambiente marino, la capacità di sopravvivenza rappresenta la questione più importante per questa categoria, soprattutto per quelli galleggianti sulla superficie. Gli ormeggi devono essere progettati con attenzione, perchè non servono solamente a tenere il dispositivo nella sua posizione, o a evitare rovesciamenti, ma solitamente interagiscono con il processo di assorbimento dell'energia ondosa. Certi dispositivi offshore, sono composti da due o più parti in movimento relativo tra di loro. Per generare potenza il convertitore deve reagire solo su sé stesso, mentre il sistema di ormeggio può cambiare la risposta in frequenza del dispositivo. I lunghi cavi elettrici sottomarini, generalmente in corrente continua, richiesti per portare la potenza prodotta alla rete sulla costa, sono fonti rilevanti di perdite. E' improbabile che una piccola centrale offshore di poche unità sia giustificata. Lo sfruttamento offshore del moto ondoso, può essere redditizio con impianti dell'ordine di decine di MW, contando parecchie unità dislocate a schiera. In mare aperto, queste grandi centrali elettriche multi-dispositivo a moto ondoso, definite "wave farm" letteralmente "fattoria a onda", possono seriamente interferire con la navigazione.

## **3.5 Principio di funzionamento**

L'EMEC, European Marine Energy Centre, classifica i WEC in otto diverse categorie a seconda della loro tipologia di funzionamento:

### **3.5.1 Attenuator**

Un attenuatore è un dispositivo galleggiante, che opera parallelamente alla direzione dell'onda, e cavalca le onde in maniera efficiente. Questi dispositivi, catturano l'energia dal movimento relativo dei due bracci, quando l'onda li attraversa;

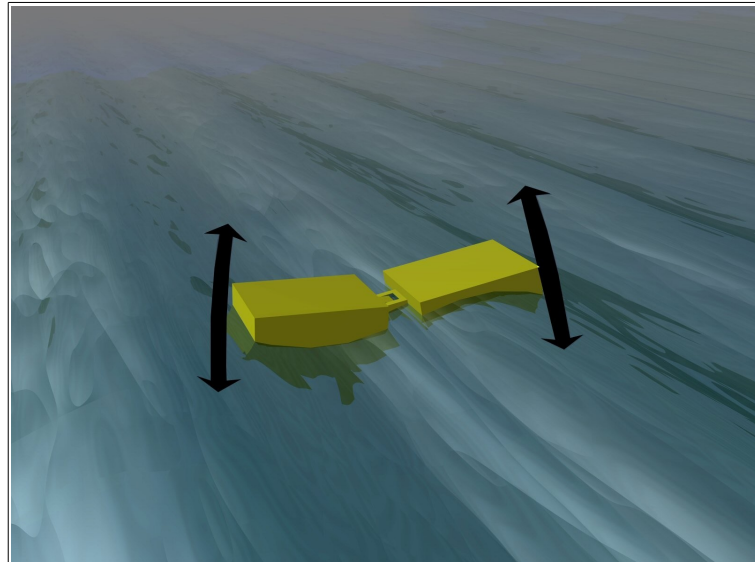


Figura 3.4. Rappresentazione grafica di un attenuatore, composto da due braccia in movimento relativo rispetto al perno centrale

L'esempio costruttivo più importante di questa categoria è il Pelamis, uno dei WEC più sviluppati e più promettenti per lo sfruttamento dell'energia oceanica. Di cui si parlerà più dettagliatamente più avanti.

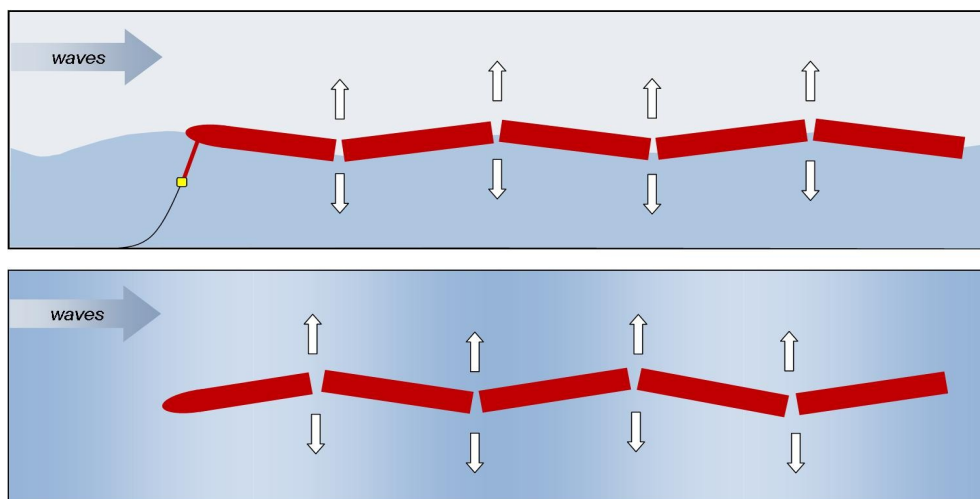


Figura 3.5. Rappresentazione grafica del funzionamento del Pelamis. I bracci di cui è composto si muovono tra di loro generando energia elettrica. Fonte Pelamiswave.

### 3.5.2 Point Absorber



Il point absorber (punto assorbitore) è un dispositivo, che possiede delle piccole dimensioni in relazione alla lunghezza d'onda. Un point absorber è una struttura galleggiante, che assorbe energia da tutte le direzioni, attraverso i suoi movimenti sulla, o vicino alla, superficie dell'acqua. Esso converte il movimento della parte superiore galleggiante relativo alla base, in potenza elettrica.

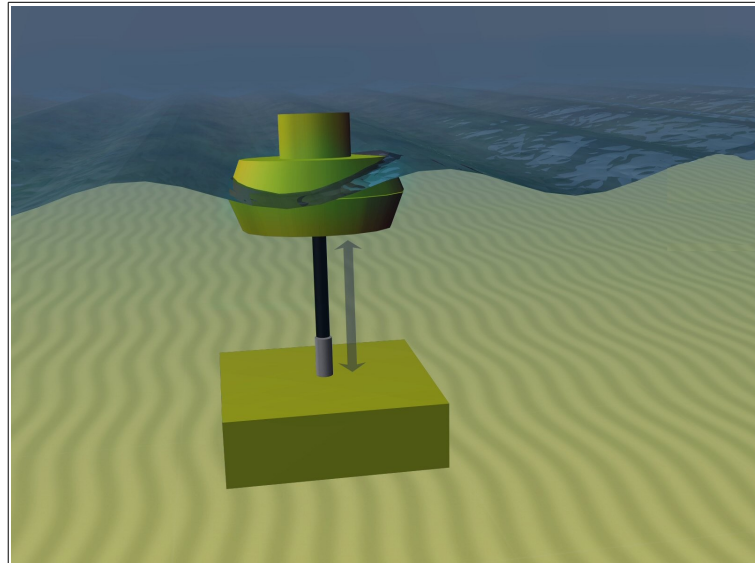


Figura 3.6. Rappresentazione grafica di un point absorber. La boa galleggiante trasmette il movimento relativo delle onde alla base, dove avviene la generazione di energia elettrica

Sono state sviluppate diverse tecnologie seguendo questo principio di funzionamento. Alcune sono prossime alla commercializzazione, come il PowerBuoy di OPT, o il WaveBob.

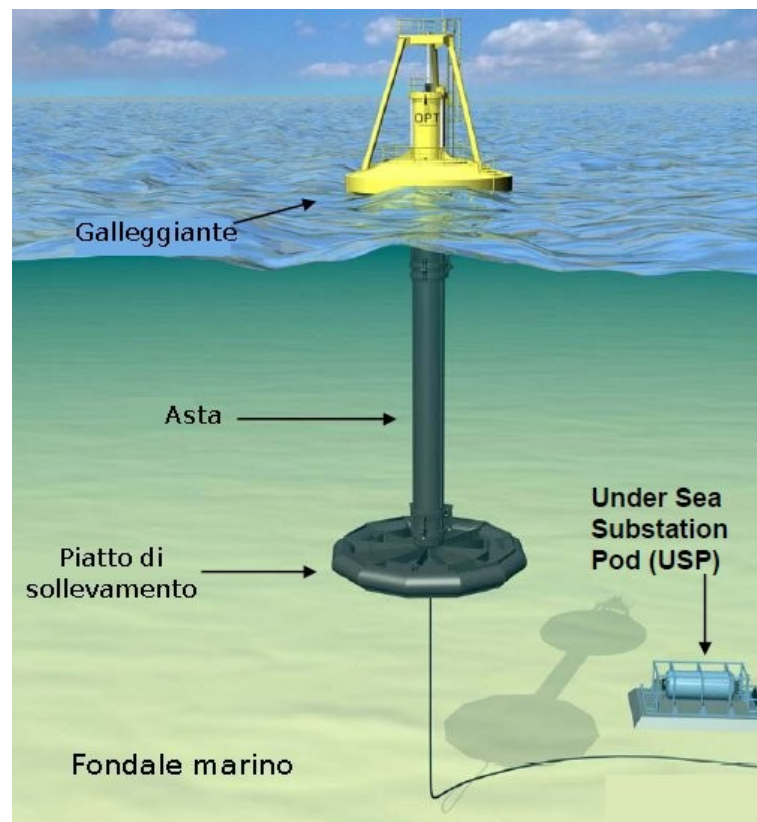


Figura 3.7. Rappresentazione grafica del PowerBuoy di OPT. Come si può notare, questo WEC non ha una base installata sul fondale marino, ma è anch'essa galleggiante sotto il livello del mare, con un'inerzia maggiore di quella del galleggiante sulla superficie. Fonte OPT

### 3.5.3 Oscillating Wave Surge Converter

Gli Oscillating Wave Surge Converter (convertitori oscillanti a flutto d'onda), estraggono energia dai flutti d'onda e dal movimento delle particelle d'acqua al loro interno. Il braccio oscilla come un pendolo, montato su un giunto imperniato, in risposta al movimento dell'acqua nelle onde.

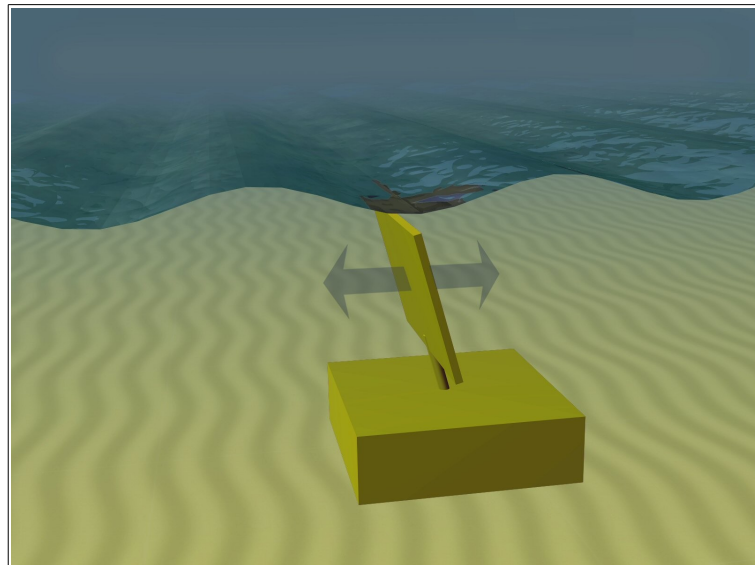


Figura 3.8. Rappresentazione grafica di un convertitore oscillante ad ondata.  
Fonte Aquaret

Gli esempi più importanti di questo tipo di convertitore sono l'Oyster della AquamarinePower e il WaveRoller dell AW-Energy Ltd.

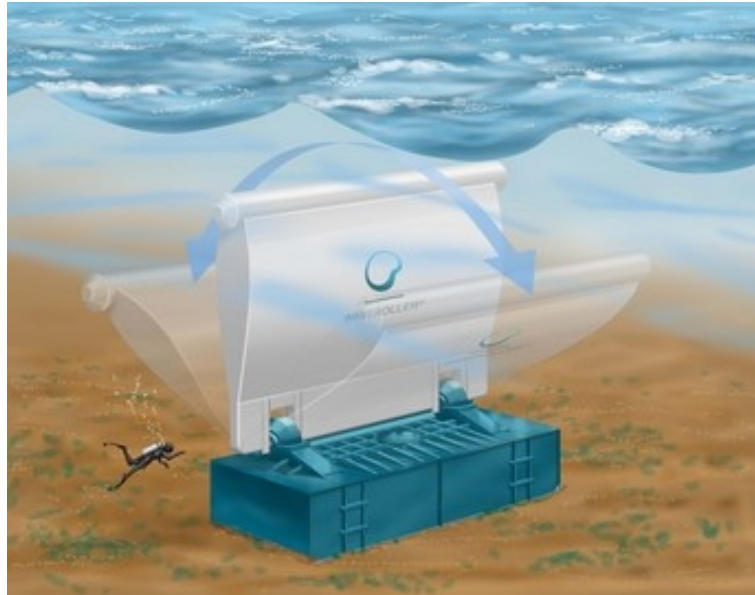


Figura 3.9. Rappresentazione grafica del funzionamento del WaveRoller. Il battente oscilla avanti e indietro tra un cavo e una cresta d'onda. Fonte AW-energy

### 3.5.4 Oscillating Water Column

Un convertitore Oscillating Water Column (colonna d'acqua oscillante), abbreviato OWC, è una struttura cava parzialmente sommersa. E' aperta al mare al di sotto del livello dell'acqua, e racchiude una colonna d'aria, in cima ad una colonna d'acqua. Le onde provocano la salita e la discesa della colonna d'acqua, che a turno comprime e decomprime la colonna d'aria. L'aria intrappolata, è lasciata fluire, verso e dall'atmosfera, attraverso una turbina, che solitamente ha la capacità di ruotare a prescindere dalla direzione del flusso d'aria (turbina Wells). La rotazione della turbina serve a generare elettricità.

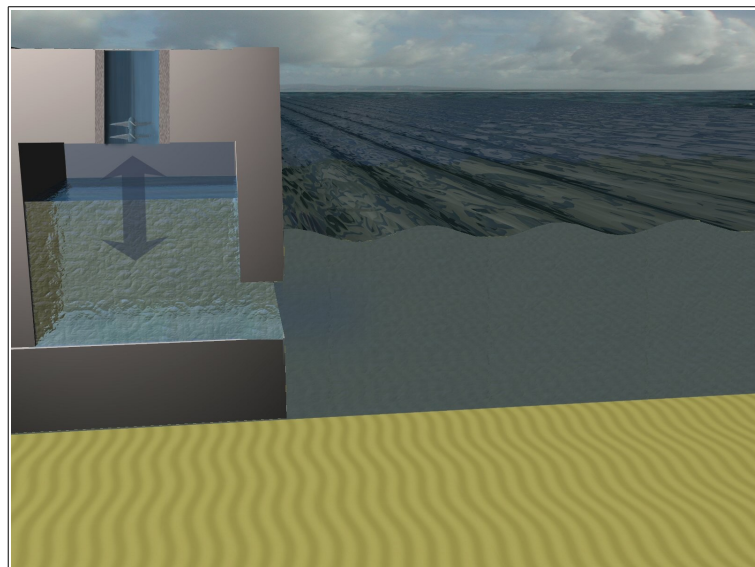


Fig. 3.10. Rappresentazione grafica di una convertitore a colonna d'acqua oscillante. Fonte Aquaret

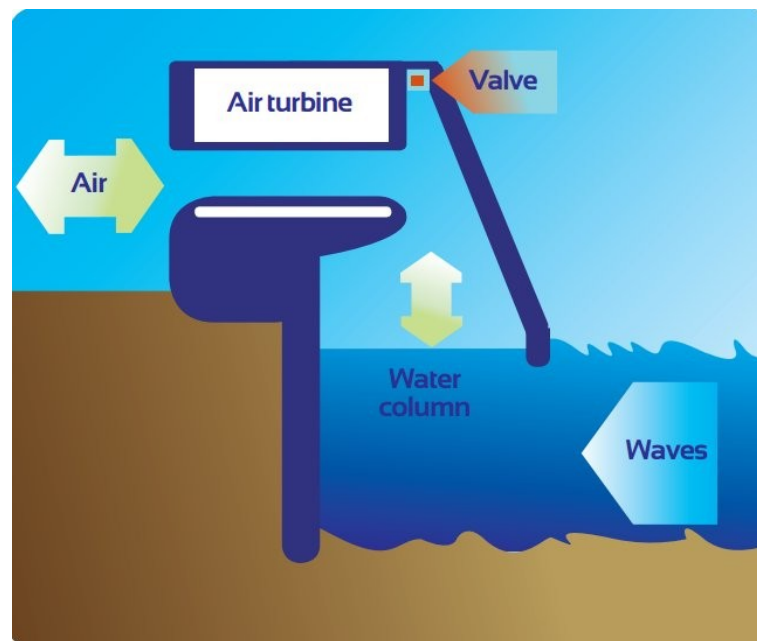


Figura 3.11. Schema di funzionamento di un convertitore a colonna d'acqua oscillante

Questo tipo di funzionamento è stato utilizzato per la realizzazione di convertitori anche su scala commerciale. Gli impianti onshore più importanti sono il Pico e il Limpet. Mentre un importante convertitore su scala pre-commerciale del tipo OWC offshore è l'OE Buoy.

### 3.5.5 Dispositivo Overtopping

I dispositivi Overtopping (a superamento) hanno il loro asse principale parallelo al fronte d'onda, perpendicolare cioè alla direzione prevalente dell'onda, e fisicamente intercettano le onde. Conosciuto in italiano come dispositivo a salto idrico, cattura l'acqua, mentre le onde irrompono nel bacino di stoccaggio. L'acqua viene poi restituita al mare, passando attraverso una convenzionale turbina a bassa prevalenza, che genera potenza. Un dispositivo overtopping può utilizzare dei collettori per concentrare l'energia delle onde.

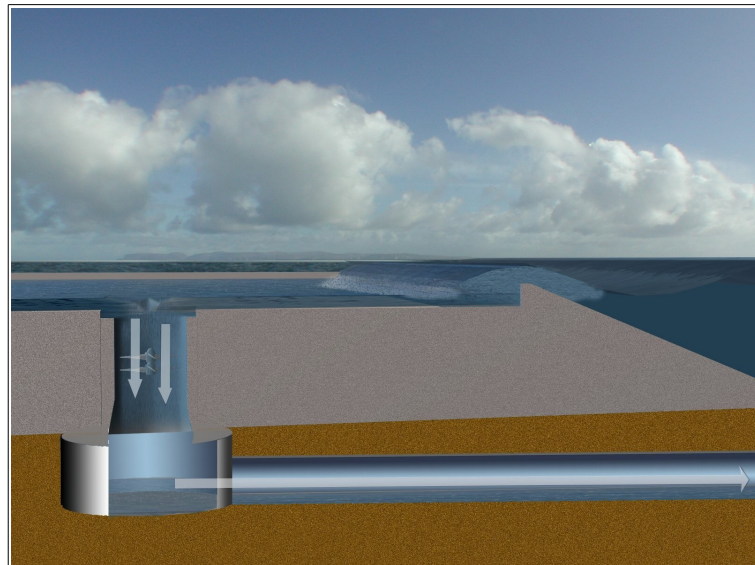


Figura 3.12. Rappresentazione grafica del principio di funzionamento di dispositivo a salto idrico

L'esempio più sviluppato di questo tipo di tecnologia è il convertitore offshore WaveDragon.

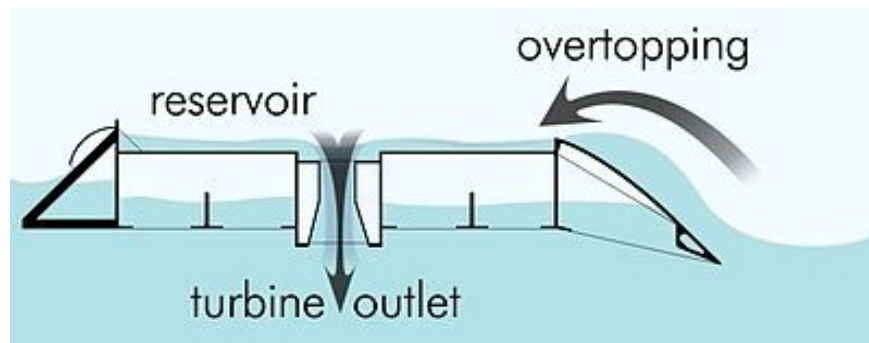


Figura 3.13. Principio di funzionamento del convertitore overtopping WaveDragon

### 3.5.6 Submerged Pressure Differential

Il convertitore a Submerged Pressure Differential (differenziale di pressione sommerso) è un point absorber sommerso, che utilizza la differenza di pressione sopra il dispositivo, tra le creste dell'onda e i cavi. E' composto da due parti principali: Una camera cilindrica riempita d'aria, fissata al fondale marino, e un cilindro superiore mobile. Quando una cresta sorpassa il dispositivo, la pressione dell'acqua al di sopra comprime l'aria nel cilindro, spostando quello superiore in basso. Quando passa un cavo d'onda, la pressione dell'acqua sul

dispositivo diminuisce e il cilindro superiore sale. La pressione alternata pompa fluido attraverso un sistema per generare elettricità. Un vantaggio di questo tipo di convertitore è che, essendo completamente sommerso, non è esposto alle forze pericolose impattanti sui dispositivi galleggianti, e riduce l'impatto visivo del dispositivo. La manutenzione può essere tuttavia difficoltosa. Essendo fissati al fondale marino, questi dispositivi sono normalmente posizionati vicini alla costa (nearshore).

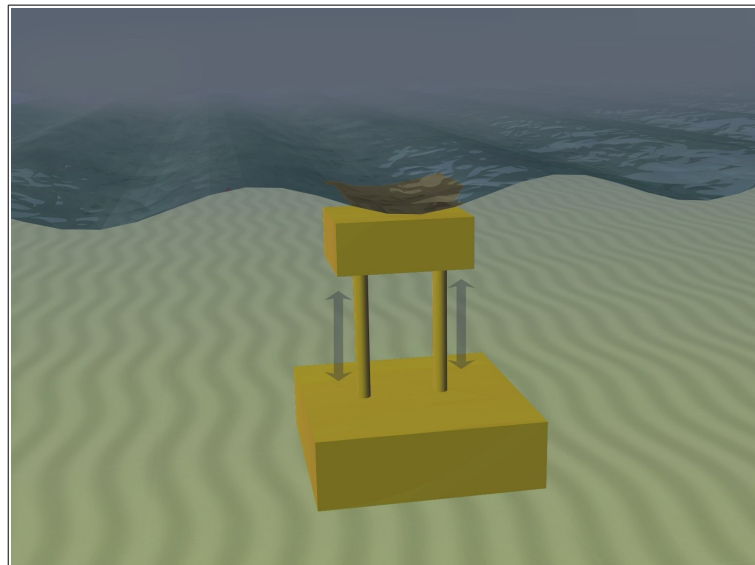


Figura 3.14. Rappresentazione grafico del dispositivo a differenziale di pressione sommerso

Il prototipo più conosciuto di WEC con submerged pressure differential è l'Archimedes Wave Swing, AWS, della AWS Ocean Energy. La quale sta sviluppando ora l'AWS-III che segue un principio di funzionamento diverso dal suo predecessore.



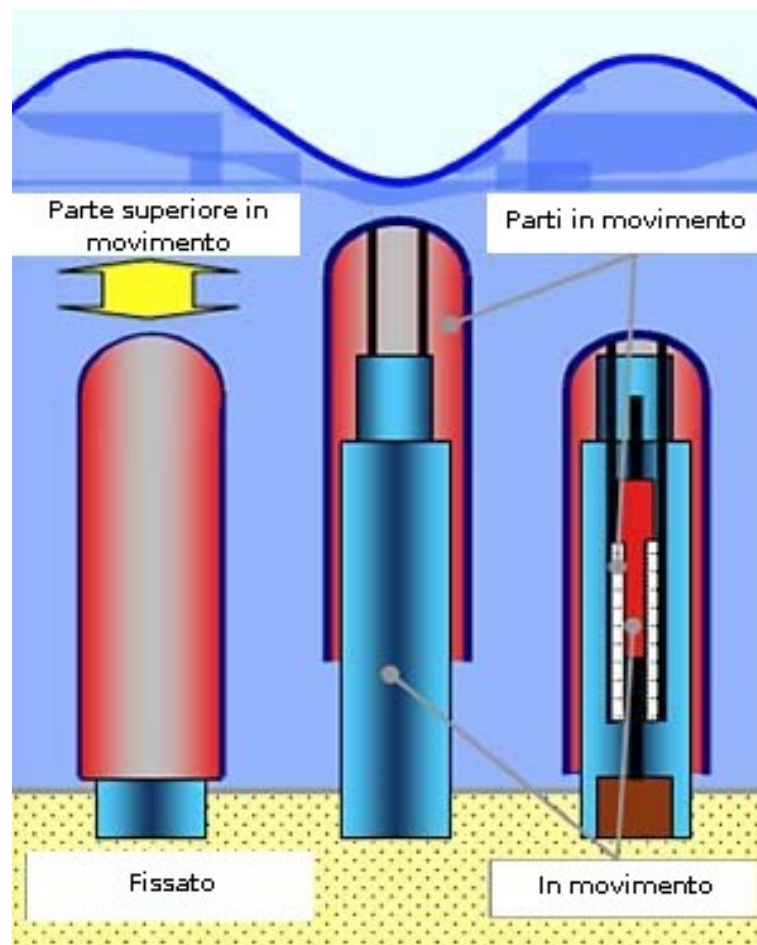


Figura 3.15. Principio di funzionamento del convertitore AWS, ora non più in sviluppo.

### 3.5.7 Bulge Wave

La tecnologia bulge wave (onda gonfia), consiste in un tubo di gomma riempito con acqua, ancorato al fondale marino diretto verso le onde. L'acqua entra da poppa, e l'onda che passa provoca delle variazioni di pressione per la lunghezza del tubo, creando un rigonfiamento. Mentre il rigonfiamento si propaga attraverso il tubo, cresce raccogliendo energia, che può essere usata per trascinare una turbina standard a bassa prevalenza, collocata a prua, dove l'acqua poi torna in mare.



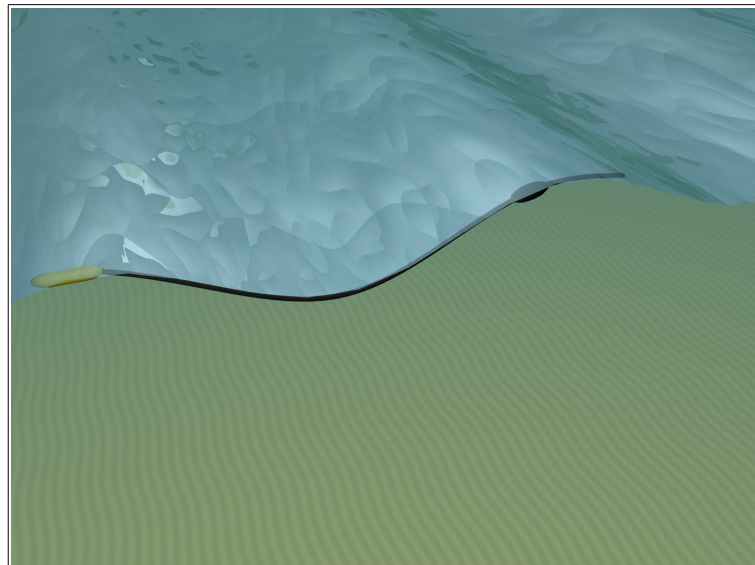


Figura 3.16. Rappresentazione grafica di un dispositivo a onda gonfia. Fonte Aquaret

L'unico esempio per questo tipo di principio di funzionamento è l'Anaconda. Progetto in fase di sviluppo da parte di un gruppo di ricerca.

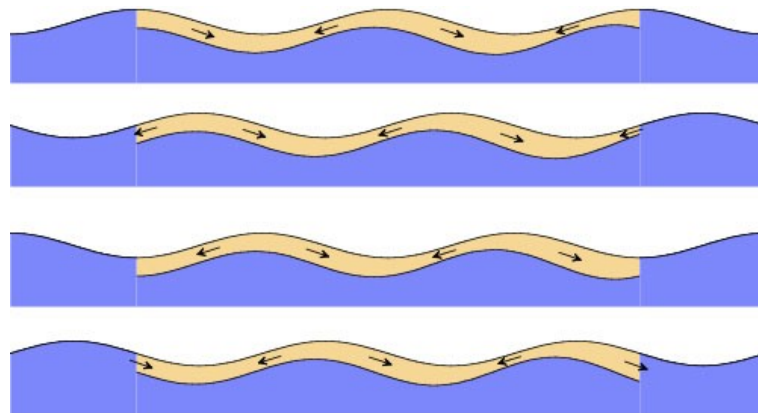


Figura 3.17. Principio di funzionamento dell'Anaconda. Le onde arrivano da sinistra, e l'acqua entrante nel tubo, viene compressa con l'avanzare delle onde.

### 3.5.8 Rotating Mass

Con la Rotating Mass (massa rotante), due forme di rotazione vengono usate per catturare l'energia ondosa, attraverso il movimento del dispositivo ondeggiante e quello oscillante sulle onde. Questo movimento, o trascina un peso eccentrico, o un giroscopio provoca una rotazione. In entrambi i casi, il movimento è collegato ad un generatore elettrico interno al dispositivo.

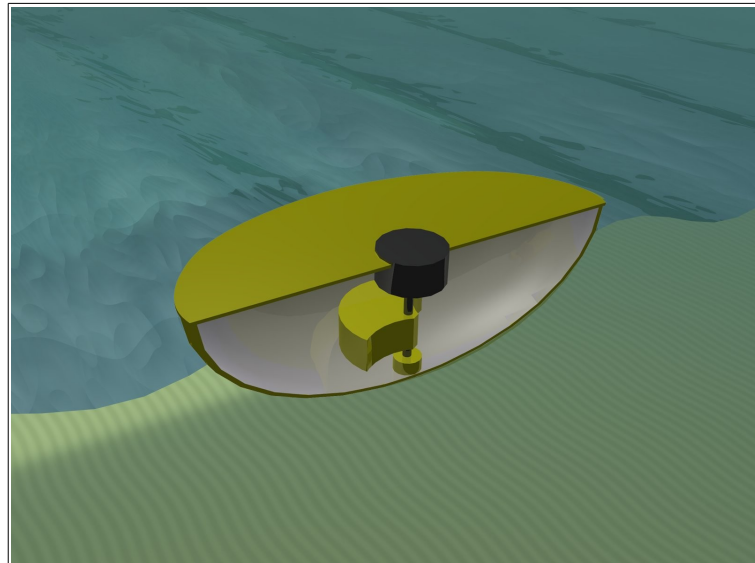


Figura 3.18. Rappresentazione grafica del dispositivo a massa rotante

Un esempio pratico di questo principio di funzionamento è il brevetto italiano dell'Isvec, o il Penguin di Wello. Si tratta di convertitori offshore a moto ondoso galleggianti contenenti un volano.

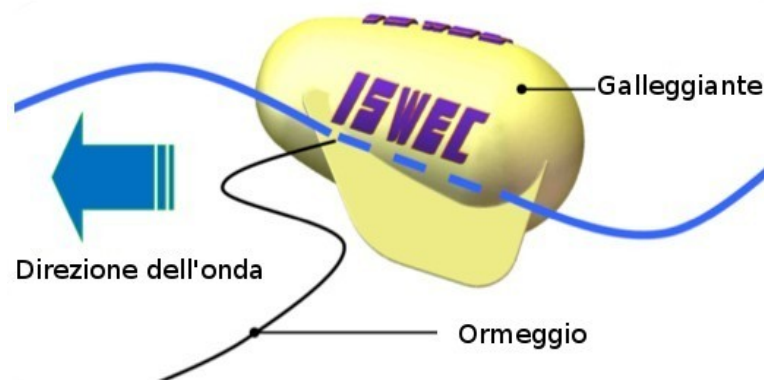


Figura 3.19. Principio di funzionamento dell'Isvec basato sulla Rotating Mass.

### 3.6 Sistema di Power Take-off

Il sistema di Power Take-off (presa di potenza), PTO, è il meccanismo che converte la potenza meccanica di input, estratta dalle onde, in potenza elettrica. Non considerando le perdite, il bilancio energetico del processo di conversione può essere rappresentato dal seguente diagramma a blocchi:

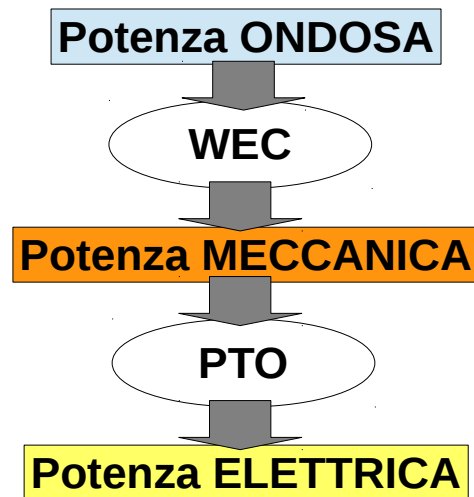


Figura 3.20. Schema a blocchi della conversione della potenza marina in potenza elettrica

Solitamente la potenza delle onde viene trasferita a un fluido ausiliario, che può essere aria, olio o acqua, nel quale è indotta una differenza di pressione. Questo fluido è un vettore energetico, che attiva un sistema meccanico (PTO), che trascina un generatore a velocità variabile. Sono in fase di ricerca delle turbine direttamente azionate dalle onde, per esempio il Wave Rotor brevettato da EcoFys, dove il PTO meccanico può essere omesso, o si guardi al progetto AWS-III. Il Power take-off è quindi il nocciolo dei convertitori di energia ondosa, essendo la tecnologia che converte le oscillazioni indotte dalle onde, da energia meccanica in elettricità. Le oscillazioni indotte sono caratterizzate dall'essere lente, con ampiezza e frequenza variabili. Conseguentemente, la potenza pneumatica è spesso una parte essenziale del PTO, essendo l'unica tecnologia ad avere le densità di forza richiesta[8]. Le tipologie di sistemi di PTO più usate sono le turbine ad aria, le turbine idrauliche (ad alta e a bassa prevalenza), i sistemi idraulici (azionati ad olio ad alta pressione) e i generatori lineari[9]. Ci sono anche dei metodi alternativi per produrre elettricità, che furono implementati in alcune configurazioni particolari di convertitori, ad esempio i polimeri elettroattivi (EAP)[10]. L'energia elettrica prodotta dal convertitore a moto ondoso, deve essere generata in una macchina elettrica, o in un generatore rotante, come nelle applicazioni eoliche o idroelettriche piccole, o con un generatore lineare a trasmissione diretta. Nell'ultimo caso, deve esserci un'interfaccia meccanica che converta il moto alternato, in un moto continuo e monodirezionale. L'apparecchiatura di potenza, è probabilmente il solo elemento

più importante nella tecnologia dell'energia ondosa, ed è finora, alla base di molti fallimenti, probabilmente la maggior parte. Le turbine ad aria erano la scelta più usata nei primi WEC, sia piccoli sia grandi, e sono ancora i PTO favoriti da molti team di sviluppo. Le turbine convenzionali non sono appropriate per i flussi che cambiano verso, per questo motivo doveva essere ideato e sviluppato un nuovo tipo di turbina[11]. Le turbine ad aria autorettificanti, sono state probabilmente l'oggetto di più riviste scientifiche di qualsiasi altro componente dei convertitori. Le turbine idrauliche a bassa prevalenza, più o meno convenzionali, vengono usate nei dispositivi overtopping, mentre le turbine ad alta prevalenza (in genere le Pelton), sono un'alternativa ai motori idraulici nei dispositivi a corpo oscillante[12]. I circuiti ad alta pressione, con gli arieti, gli accumulatori di gas e i motori idraulici, sono stati utilizzati in diversi prototipi di WEC a corpo oscillante, (incluso il Pelamis) [13]. Questo può essere considerato, come un utilizzo alternativo di un dispositivo convenzionale. Nonostante i generatori elettrici lineari, siano stati proposti sin dalla fine degli anni settanta, per i dispositivi a moto ondoso con moto di traslazione, e siano stati equipaggiati in parecchi dispositivi testati in mare (come l'AWS), essi sono ancora allo stadio di sviluppo di prototipo[14]. La capacità di stoccare energia, è una caratteristica altamente desiderabile nei convertitori a moto ondoso, e può essere procurata in una molteplicità di modi, come nel caso dell'effetto del volano in una turbina ad aria, i serbatoi d'acqua nei dispositivi con sistema idraulico, e gli accumulatori di gas nei circuiti idraulici ad alta pressione, ad olio o ad acqua. L'uso di grandi condensatori in collegamento con la tecnologia dei generatori lineari è in previsione. Il Power take-off esiste quindi principalmente in sei forme[15]:

- Turbine ad aria;
- Sistemi idraulici ad olio a circuito chiuso;
- Trasmissione diretta (generatori lineari);
- Turbine idrauliche a bassa prevalenza;
- Pompa idraulica;
- Sistemi idraulici ad acqua a circuito aperto (pompa peristaltica);

### **3.6.1 Turbina ad aria**

La turbina ad aria di un OWC, è soggetta a condizioni più dure rispetto alle turbine di qualsiasi altra applicazione, incluse le turbine eoliche. Certamente il verso del flusso attraverso la turbina cambia, ad eccezione del caso in cui sia fornito di un sistema di rettifica, ma questo fino ad ora è risultato non praticabile, e il flusso è anche altamente variabile in maniera casuale su diverse scale di tempo, dai pochi secondi alle variazioni stagionali. In un convertitore a colonna d'acqua oscillante, il sistema di PTO consiste in una turbina ad aria a flusso assiale autorettificante, ovvero la sua coppia non è sensibile alla direzione

del flusso d'aria, posizionata in un condotto di collegamento della camera d'aria con l'atmosfera esterna. Estrarre energia dal flusso d'aria è più vantaggioso perché questo ha una velocità maggiore delle onde più lente, e perciò è più semplice da accoppiare a un generatore. Una turbina autorettificante ha la capacità di operare senza un sistema di valvole autorettificanti, ruotando sempre nella stessa direzione con un flusso d'aria bidirezionale. Essa viene solitamente connessa a un generatore a velocità variabile. L'elemento più critico nel processo di conversione dell'energia è la turbina stessa, rendendo essenziale l'ottimizzazione delle sue prestazioni, soprattutto dal punto di vista del prezzo. Le due turbine ad aria più usate normalmente nei convertitori OWC sono le turbine Wells e le turbine ad impulso[16].

### *Turbina Wells*

La turbina Wells, è utilizzata in un ambiente a bassa pressione, per evitare la rettifica del flusso d'aria con tecnologie costose. Il più grande vantaggio di questa tipologia è la sua bidirezionalità; nonostante la direzione del flusso d'aria cambi, essa mantiene la rotazione dell'asse della turbina nella stessa direzione. Tuttavia, questa capacità di utilizzo bidirezionale comporta dei difetti; il profilo alare delle alette della turbina deve essere simmetrico, ciò porta ad una caduta di efficienza durante la conversione. Questo succede perché, i profili alari simmetrici, hanno dei coefficienti di resistenza aerodinamica maggiori di quelli asimmetrici, che si usano con una direzione del flusso d'aria costante. Inoltre, come conseguenza del profilo alare simmetrico, in certi casi avviene la separazione del flusso. La turbina andrà in stallo e, in casi gravi, la coppia motrice diventerebbe negativa. Un altro svantaggio, è l'aver bisogno di un motore o di un generatore per l'avviamento, in aggiunta alla dimensione relativamente grande se paragonata al suo livello di potenza[17].



Figura 3.21. Turbina Wells dell'impianto OWC a Mutriki in Spagna

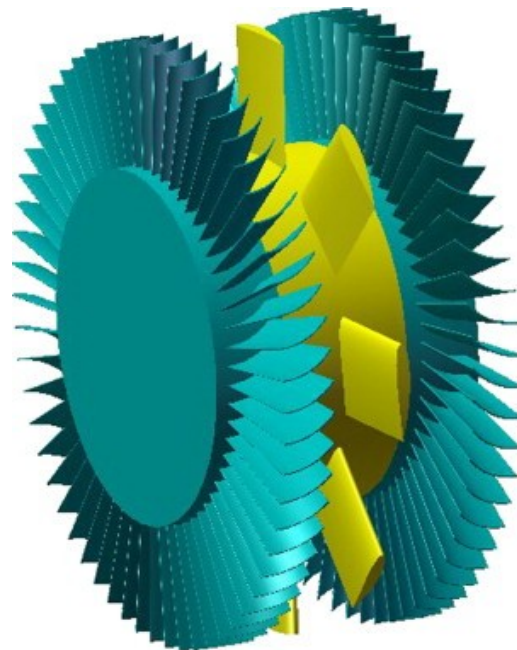


Figura 3.22. Rappresentazione grafica della turbina Wells con palette direttrici

#### *Turbina ad azione*

L'alternativa più comune alla turbina Wells, sembra essere la turbina ad azione auto-rettificante. Le turbine ad azione sono turbine controllate con palette direttrici regolabili. Un set di palette direttrici si può trovare su ciascun lato del

rotore. Queste palette sono imperniate e possono ruotare liberamente tra le due angolazioni date, che sono determinate da una configurazione meccanica. Quando il flusso d'aria cambia direzione, anche le palette si capovolgono e si orientano nella giusta posizione. Nella guida a monte, si comportano come un ugello, mentre nella guida a valle, si comportano come un diffusore.

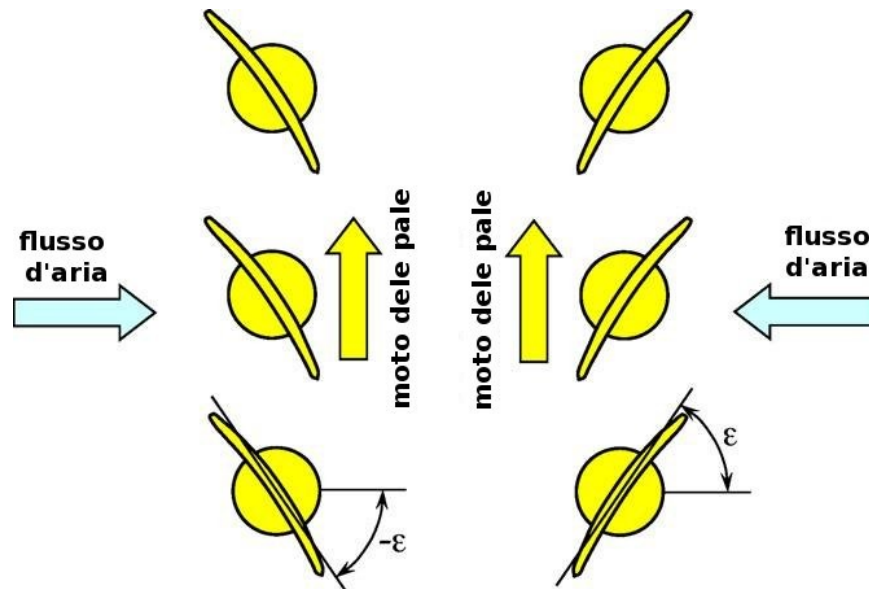


Figura 3.23. Schema del funzionamento di auto-rettifica delle palette diretrici.

Grazie al loro design, sono libere dal fenomeno di stallo. Sono anch'esse ad avviamento automatico, ma è più complicato del progetto della turbina Wells, dato che ha bisogno di far funzionare le palette diretrici. Quando si paragona l'efficienza dei due sistemi di turbine, si nota che la turbina ad azione ha di gran lunga un miglior campo operativo efficiente delle turbine Wells. D'altra parte, nel punto di ottimo operativo, la turbina Wells ha un'efficienza considerevolmente più alta. A causa del più ampio campo operativo, la turbina ad azione può anche funzionare a velocità rotazionali più basse[18].

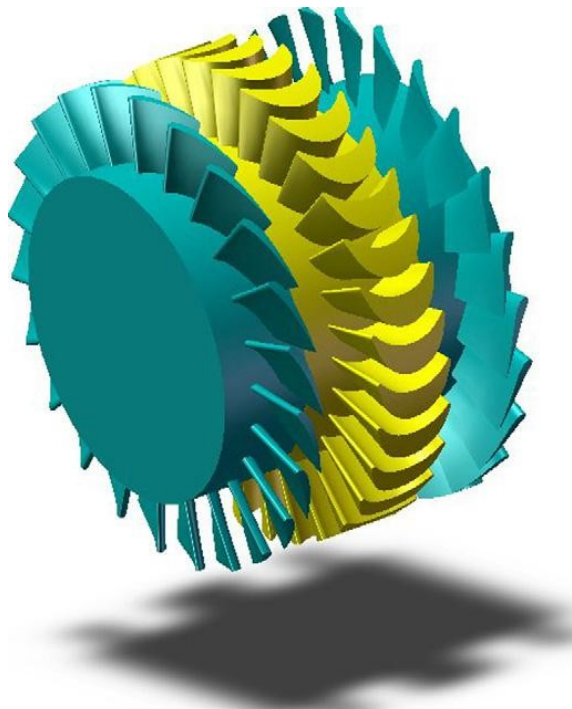


Figura 3.24. Raffigurazione grafica di una turbina ad azione

### 3.6.2 Sistemi idraulici

Un grande gruppo di convertitori si basa sulla conversione diretta delle onde in un moto meccanico oscillante, come per esempio i Point Absorber o i sistemi multipli di Point absorber. Oggi, le soluzioni di PTO per questi sistemi, sono caratterizzate da basse efficienze ed affidabilità. La ragione è che le onde inducono delle lente oscillazioni irregolari, che richiedono il trattamento di grandi forze alternate per estrarre potenza. Conseguentemente, la potenza pneumatica è spesso una parte determinante nel sistema di conversione, essendo l'unica tecnologia ad avere le densità di forza richiesta. Comunque, i sistemi di potenza pneumatica, sono spesso caratterizzati da basse efficienze, specialmente a carico parziale. Questa è una proprietà insita della potenza ondata. Si considera normale un rapporto pari a dieci, tra i picchi e la media della potenza assorbita. I sistemi idraulici sono in grado di gestire grandi forze a basse velocità; usano pompe e motori a cilindrata variabile accoppiata. Nel loro punto ideale, l'efficienza massima è circa l'80%[19]. Tuttavia, fuori da questo punto ideale, l'efficienza accusa un calo, che può diventare meno del 60%[20], quando le perdite aumentano, causate da fuoriuscite, aumento dell'attrito viscoso e di coulomb e dalla comprimibilità. Con l'integrazione di accumulatori idraulici nel sistema, il PTO sarà capace di spianare le irregolarità nelle variazioni di potenza incidente. Sfortunatamente, la maggior parte dei dispositivi con un PTO



idraulico sono posizionati offshore, il che aumenta i problemi. Anche in seguito a preparazioni scrupolose, in cui le tubazioni devono essere completamente riempite con l'olio idraulico, così che nessuna bolla d'aria rimanga nel sistema, e le guarnizioni vengono controllate, il sistema spesso soffre di guasti: i tubi idraulici tendono a guastarsi troppo spesso, e i connettori idraulici perdono troppo facilmente. Questo diminuisce sensibilmente il tempo di funzionamento del sistema e lo rende non affidabile. Oltretutto, nel caso di dispositivi offshore, la manutenzione è piuttosto problematica oltre che costosa. I sistemi a olio ad alta pressione, sono particolarmente adatti per convertire l'energia da forze o coppie molto grandi, applicate dalle onde sui corpi che oscillano lentamente (in traslazione o rotazione). Il circuito idraulico include solitamente un sistema di accumulo di gas, in grado di immagazzinare energia per pochi periodi dell'onda, il che può appianare l'estrema irregolarità della potenza assorbita dalle onde. Il moto del corpo è convertito in energia idraulica, attraverso un pistone o un ariete, o una serie di questi. Infine un motore idraulico trascina un generatore elettrico convenzionale.

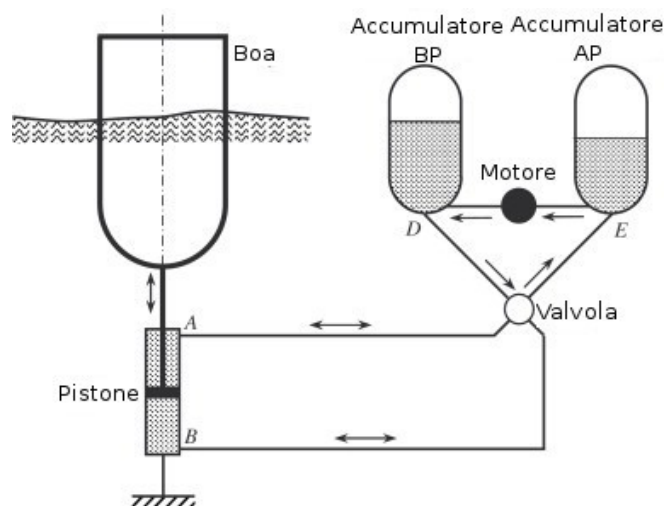


Figura 3.25. Rappresentazione schematica di un sistema idraulico provvisto di sistema di accumulo per un Point Absorber

### 3.6.3 Generatore lineare

L'utilizzo di un generatore a induzione comprende un PTO meccanico specifico, che induce delle perdite aggiuntive che interessano l'efficienza globale del convertitore. Questo inconveniente può essere evitato usando una trasmissione diretta. Nel caso di un WEC a trasmissione diretta, dove la parte mobile del WEC è accoppiata direttamente al PTO, si può quindi utilizzare un generatore lineare. Esso produce elettricità, direttamente dal movimento lineare tra lo statore fisso, che contiene gli avvolgimenti di armatura, e il traslatore in

movimento, dove i magneti vengono montati con polarità alternata. Lo spazio fisico, tra il traslatore e lo statore, viene chiamato traferro. Quando il campo magnetico cambia, a causa del moto del traslatore secondo la legge di Faraday, viene indotta una tensione negli avvolgimenti. I fattori più importanti per questi dispositivi sono[21]:

- Lo smorzamento: l'intero sistema è di tipo oscillante, il che significa che le onde si comportano come una forza motrice, mentre il generatore come uno smorzatore, e l'energia assorbita dipende fortemente dallo smorzatore;
- La forza di reazione: a causa della trasmissione diretta, il generatore si muove lentamente, e per avere la stessa produzione di potenza, la forza di reazione deve essere grande;
- Sovraccarichi: le onde in arrivo variano continuamente, la loro velocità è diversa, e conseguentemente, il generatore produce potenza variabile, e c'è bisogno di prendere in considerazione i valori estremi;
- Lunghezza della corsa: dovrebbe essere impostata a seconda dell'altezza delle onde;
- La connessione alla rete: per connettersi alla rete commerciale, il livello di tensione deve essere stabilito, la corrente deve essere rettificata, e la frequenza cambiata.

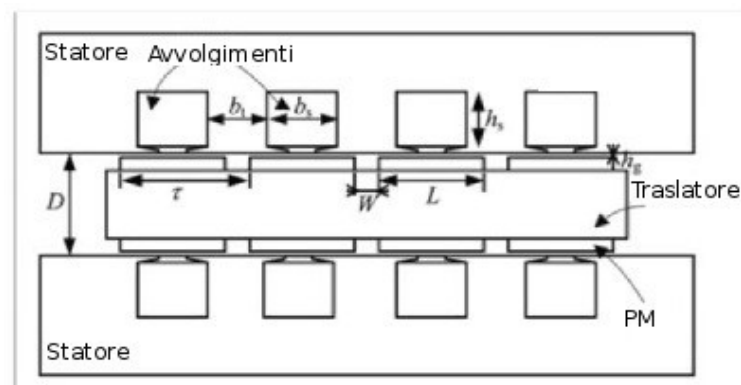


Figura 3.26. Schema di un generatore lineare a magneti permanenti. La sigla PM significa Permanent Magnet (magnete permanente)

In confronto agli altri PTO, esso è capace di convertire l'energia meccanica direttamente in energia elettrica, mantenendo un'efficienza ragionevole. E' anche più semplice degli altri sistemi e richiede meno manutenzione. Sono tuttavia piuttosto costosi, nonostante il prezzo dei magneti sia recentemente crollato, il che rende questo tipo di PTO un'opzione economicamente fattibile. Nonostante ciò, questa soluzione non viene ancora utilizzata nella maggior parte dei WEC sviluppati. Devono essere ancora superate delle difficoltà ingegneristiche,

riguardo l'integrazione della trasmissione diretta nei WEC, tra cui i problemi maggiori sono la dimensione e il peso[22]. I convertitori a moto ondoso solitamente si muovono a velocità molto basse, ad esempio un picco di 1-2 m/s è normale[23]. Di conseguenza, è necessaria un'ampia superficie al traferro, per generare forze elevate, ma questo porta ad avere macchinari molto pesanti. Un dispositivo a trasmissione diretta, che sia stato sviluppato con potenze nell'ordine dei megawatt è l'AWS (Archimede Wave Swing), ma questo non è più in funzione. Per lo scopo, furono studiati diversi tipi di generatori lineari. Queste ricerche hanno portato alla conclusione, che il generatore a magnete permanente, a flusso trasverso, sia un buon candidato per le applicazioni a moto ondoso, in termini sia di densità di potenza sia di efficienza più alte[24]. Si guardi al progetto Lysekil, in Svezia, dove è stato progettato un convertitore Point Absorber, che utilizza questa tecnologia.

### **3.6.4 Turbina idraulica**

Si usano le turbine a reazione a flusso assiale, come nelle centrali mini-idroelettriche convenzionali a bassa prevalenza, per convertire la prevalenza, tipicamente 3-4 metri a grandezza naturale, creata tra il serbatoio di un dispositivo overtopping, e il livello del mare. Il flusso può essere controllato da palette direttrici regolabili di immissione. In certi casi, anche le palette del rotore possono essere regolate (turbine Kaplan), il che migliora molto l'efficienza su una vasta gamma di portate. Questa tecnologia tuttavia può essere costosa, tanto da non essere normalmente impiegata nelle piccole turbine per le applicazioni a moto ondoso. Le turbine ad azione ad alta prevalenza, tipicamente dalle decine alle centinaia di metri, vengono adottate in alcuni convertitori, come quelli con corpo oscillante, come alternativa ai motori idraulici, col vantaggio di usare acqua, che non inquina, piuttosto che olio. Il flusso può essere controllato da un ago, la cui posizione assiale, all'interno dell'ugello, è controllata da un servomeccanismo. Il circuito idraulico include un ariete idraulico, o un set di arieti, e può includere anche un sistema di accumulo di gas. Queste turbine idrauliche, a bassa e ad alta prevalenza, possono raggiungere efficienze massime del 90%[25]. La loro efficienza, è in genere abbastanza sensibile al rapporto tra la prevalenza e la velocità di rotazione, il che rende l'utilizzo di generatori elettrici a velocità variabile estremamente vantaggioso, specialmente nel caso delle turbine Pelton, in dotazione ai convertitori a corpo oscillante[26].

### **3.6.5 Problematiche dei PTO**

I sistemi di Power take-off per il moto ondoso, comprendono delle parti in movimento, attivate direttamente dal movimento dell'onda (pompa ad ariete idraulico, pompa elastomerica e turbina ad aria), o dal potenziale del moto

ondoso (turbine idroelettriche), e un sistema per convertire l'energia meccanica in elettricità (generatori). Il grado di conversione dipende ovviamente dalla tecnologia. Il disturbo più importante per l'ambiente, derivato dal PTO dei dispositivi, è dovuto al rumore e alla perdita accidentale di olio. Le pompe ad ariete idraulico, le turbine idrauliche e le turbine ad aria sono rumorose, e soprattutto le turbine ad aria possono essere di grande disturbo per le comunità locali. Il sistema delle pompe ad ariete idraulico e quelle elastomeriche possono generare una perdita d'olio in conseguenza ad un malfunzionamento. Il rumore sottomarino, e l'interferenza con la qualità dell'acqua, sono problematiche soggette a grandi incertezze, pertanto non è possibile fare una tabella riassuntiva delle valutazioni dell'impatto ambientale atteso[27].

### 3.7 Difficoltà tecnologiche dei WEC

Per sfruttare il moto ondoso, devono essere affrontate molte sfide per creare una macchina affidabile ed economicamente fattibile nello stesso momento. Di seguito vengono elencate le principali difficoltà da superare per la progettazione di un buon convertitore a moto ondoso[28]:

- A causa dell'irregolarità dell'ampiezza delle onde, della fase e della direzione, il dispositivo deve essere adeguato alla risorsa in modo da operare efficientemente. La più grande difficoltà sta proprio nel riuscire ad ottenere un'efficienza di conversione alta su un'intera gamma di parametri d'eccitazione.
- In condizioni meteorologiche estreme, il carico sul WEC può essere anche cento volte maggiore del carico medio. Per questa ragione il dispositivo deve essere sovradimensionato, per poter resistere a condizioni così rigide. Ne consegue un aumento del costo dell'impianto. I ricavi generati dal dispositivo, si basano tuttavia su condizioni operative nominali, con un prezzo del WEC più basso. Questo comporta un importante problema di progettazione, che rischia di rendere il dispositivo un fallimento economico.
- Un'altra sfida importante è l'accoppiamento del moto lento e irregolare, con frequenze sui 0.1 Hz, per azionare il generatore, con una qualità dell'energia prodotta accettabile per la rete di utenza. Ci sono diversi modi di ovviare a questo problema: implementando un sistema di stoccaggio dell'energia nel dispositivo, in base al principio di funzionamento del convertitore a moto ondoso. Ad esempio, l'acqua immagazzinata nei serbatoi sopra ai dispositivi overtopping, può essere usata come un tampone energetico, o usando degli accumulatori idraulici nei PTO idraulici, oppure attraverso l'uso di un'unità standard di immagazzinamento di energia, che può essere una pila a combustibile, gli accumulatori di energia a magneti superconduttori, lo stoccaggio di

energia in super condensatori, e l'immagazzinamento in batteria. Un'altra opzione è di connettere i dispositivi in schiera per appianare la variabilità della potenza prodotta.

Per creare un convertitore di successo, devono essere intraprese sul dispositivo una serie di test approfonditi e di procedure di valutazione perché, nella maggior parte dei casi, gli inventori dei WEC non hanno una conoscenza dettagliata né un'esperienza necessaria alla gestione d'esercizio di dispositivi offshore. Uno studio analitico di un WEC idraulico viene introdotto in [29], in cui vengono considerati i seguenti sottosistemi di un convertitore: gli ormeggi, la struttura, sei PTO (in parallelo), e la trasmissione di potenza. I risultati dello studio mostrano che, dopo 6000h di funzionamento, il WEC ha il 15% di affidabilità massima in qualsiasi caso. Tuttavia, questi risultati così negativi sono dovuti ad un prototipo, con dati di tassi di insuccesso spesso generici e obsoleti o pessimistici, nessuna attività di riparazione considerata per 12 mesi, e aggiustamenti rudimentali. Il più grande problema che viene affrontato dai progettisti di convertitori a moto ondoso, è di come bilanciare l'efficienza di cattura, il costo di costruzione e la sopravvivenibilità del progetto. Molti progetti che sembrano favorevoli sulla carta, e che hanno un'alta efficienza di cattura, se costruiti, verrebbero distrutti dalle onde più grandi. Nonostante la costa occidentale della Scozia abbia una media di 60-80 kW/m di fronte d'onda, in condizioni tempestose questo, può salire fino a 10000 kW/m[30]. Il parametro utilizzato dai progettisti delle strutture offshore nell'industria petrolifera è l'onda di progetto sui 50 anni, ovvero l'onda più grande prevista in un periodo di 50 anni; nel caso della costa occidentale della Scozia, si pensa sia nell'ordine di 30-40 m[31]. Molti problemi ruotano attorno al cablaggio richiesto, per trasportare l'energia sulla costa, e come trasmettere questa energia ai clienti. I cavi devono essere lunghi, e devono essere capaci di resistere alle forze trasmesse alle centrali dei dispositivi, tramite le loro estremità. Un grande problema riscontrato dai progettisti, è di portare i modelli su scala industriale, dalla vasca di prova, alle scale in percentuale: modelli 1/10, 1/25, fino a grandezza naturale. In molti casi un raddoppio di scala, può significare il quadrato delle forze, e con esse nuovi problemi da risolvere. Un'ulteriore difficoltà è che, con l'energia ondosa, non si progetta di raggiungere la conversione massima. Un dispositivo che raggiunge il 100% di conversione per un certo periodo e altezza dell'onda, avrà inevitabilmente una scarsa efficienza di cattura con altre caratteristiche del mare. Ciò che viene richiesto, è un progetto che ricopra la più vasta area di cattura, in cui la maggior parte della potenza sia disponibile per la maggior parte dell'anno, permettendo perciò, di generare elettricità per la maggior parte della vita del dispositivo.



## Capitolo 4

### Prototipi e modelli pre-commerciali proposti nel mondo

La classificazione fatta nel terzo capitolo, lascia intuire quanti convertitori per il moto ondoso siano stati progettati e sviluppati recentemente. Molti di questi hanno raggiunto un livello sperimentale prossimo alla commercializzazione, dopo essere stati testati a lungo nei siti di prova più importanti d'Europa per il moto ondoso. Altri progetti invece si affermano per la loro semplicità, economicità ed affidabilità. In questo capitolo quindi si cerca di descrivere le tecnologie più significative a partire da quelle indicate dal WestWave project, con una sezione a parte per i progetti sviluppati in Italia.

#### 4.1 WestWave Project e altri WEC

Il WestWave project è un progetto di collaborazione, tra i maggiori attori del settore irlandese per lo sviluppo del moto ondoso. Il progetto unisce gli sviluppatori tecnologici, i fornitori elettrici e i corpi governativi per dimostrare come le centrali a moto ondoso possano essere costruite e operate in Irlanda. Il WestWave vuole installare e operare dei convertitori a moto ondoso capaci di generare 5 MW di energia pulita entro il 2015, sfruttando solo una piccolissima parte della potenza incidente sulle coste occidentali irlandesi. Costruendo una centrale a moto ondoso da 5 MW, il progetto dimostrerà l'abilità dell'Irlanda a costruire, impiegare e operare i convertitori. Spianerà la strada anche per i progetti commerciali, in termini di procedure di permesso, quali la locazione costiera, i permessi, l'accesso alla rete elettrica e l'infrastruttura locale. WestWave rappresenta il terzo ed ultimo passo nella strategia del governo irlandese per l'energia oceanica prima che i progetti commerciali possano iniziare a raggiungere il traguardo dei 500MW entro il 2020[1]. Il progetto WestWave valuterà, selezionerà e impiegherà i convertitori a moto ondoso più adatti che siano testati e pronti per il funzionamento nelle acque irlandesi. Questi dispositivi scelti impiegheranno tecnologie avanzate per estrarre il massimo dell'energia dalle onde, pur resistendo alle dure condizioni dell'Oceano Atlantico. Il criterio per la selezione della tecnologia, include la prestazione tecnica, la sicurezza, i metodi di manutenzione, il progetto strutturale, l'impatto ambientale e i tempi di impiego. Le tecnologie candidate attualmente di convertitori a moto ondoso per WestWave sono: Wavebob, OE Buoy (o StromBuoy), Oyster e Pelamis[2].

#### 4.1.1 Oyster

Distanza dalla costa	Nearshore
Principio di funzionamento	Oscillating Wave Sure Converter
Power Take-Off	Turbina idraulica a bassa prevalenza

Fondata nel 2005, con sede ad Edimburgo, AquamarinePower sta sviluppando la tecnologia a potenza ondata Oyster per catturare l'energia che si trova nelle onde vicino alla costa e convertirla in elettricità pulita e sostenibile[3].

##### *Principio di funzionamento*

La tecnologia dell'Oyster wave power di Aquamarine Power, cattura l'energia nelle onde vicine alla costa e la converte in elettricità pulita e sostenibile. Essenzialmente l'Oyster è una pompa alimentata a onde che spinge acqua ad alta pressione per azionare una turbina idroelettrica sulla costa. E' composto di un battente galleggiante, incernierato, attaccato al fondale ad una profondità tra i 10 e i 15 metri, circa mezzo chilometro dalla costa. Questa posizione è spesso riferita come nearshore. Il battente incernierato dell'Oyster, che è quasi completamente sommerso, beccheggia indietro e avanti nelle onde vicine alla costa. Il movimento del battente aziona due cilindri idraulici che spingono acqua ad alta pressione sulla costa attraverso una condotta sottomarina per azionare una turbina idroelettrica convenzionale. Nel futuro, le condotte sottomarine conetteranno dispositivi multipli a moto ondoso Oyster ad un singolo impianto sulla costa. Alla fine l'Oyster verrà installato in centrali a moto ondoso di centinaia di dispositivi connessi che generano centinaia di megawatt di elettricità. Posizionando l'Oyster vicino alla costa, si cattura una grande porzione di energia disponibile nell'oceano mentre si evitano le forti tempeste che si verificano più al largo nel mare[4].



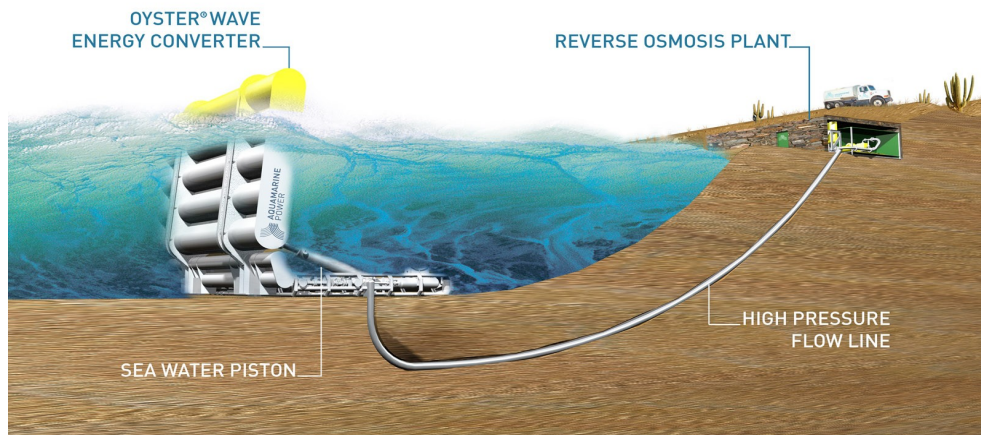


Figura 4.1. Schema di un impianto Oyster. Si evidenzia la presenza del tubo ad alta pressione, che trasporta l'acqua all'impianto idroelettrico sulla riva. Fonte AquamarinePower

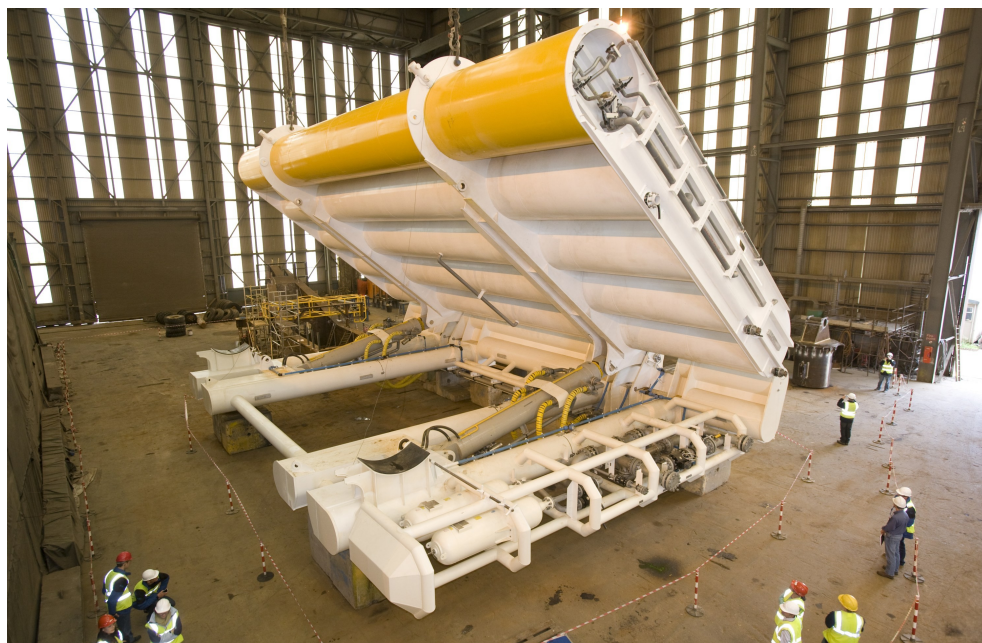


Figura 4.2. Dispositivo Oyster durante la costruzione. Fonte AquamarinePower

### *Sviluppo della ricerca*

Fino ad ora, Aquamarine Power ha impiegato e testato due dispositivi Oyster a grandezza naturale all'EMEC: l'Oyster 1 da 315kW e l'Oyster di seconda generazione da 800kW, spendendo più di £3m nelle Orkney e lavorando con oltre 40 imprese locali. L'Oyster 800 fu connesso alla rete nel Giugno 2012 ed è

tuttora in prova al sito di prova Billia Croo dell'EMEC. Aquamarine Power ha anche garantito il consenso ad installare fino ad altri due Oyster all'EMEC, a fianco dell'Oyster 800. Aquamarine Power, sta tuttora sviluppando la sua prima centrale elettrica commerciale a moto ondoso di Oyster da 40MW, al largo della costa nord-ovest di Lewis in Scozia, e una proposta di centrale a moto ondoso di Oyster da 200MW al largo della costa delle Orkney, come joint venture di collaborazione con la compagnia SSE Renewables[5]. Nel Luglio 2013, Aquamarine Power ha annunciato i dettagli dei miglioramenti programmati per il dispositivo a moto ondoso Oyster 800, insieme con alcuni recenti calcoli di produzione. Le migliorie, conosciute come "Oyster 800 Product Improvement", comprendono lo spegnimento dell'Oyster 800, che è stato in funzione da Febbraio 2013 all'EMEC nelle Orkney. L'ufficiale amministratore delegato della Aquamarine Power, Martin McAdam ha detto che: "Quest'anno l'Oyster 800 ha funzionato con delle altezze significative d'onda pari a 5.3 metri e dei picchi d'onda di 9m. Il concetto funziona, e la nostra centrale idroelettrica a riva funziona bene. La struttura dell'Oyster 800 si è comportata bene nelle condizioni più estreme di tempesta. Alcune date più importanti dell'ultimo test avviato sull'Oyster 800[6]:

- 14 Febbraio 2013: Il battente dell'Oyster 800 si sollevò dal fondale marino e si posizionò in modalità operativa;
- 27 Febbraio 2013: Inizia la generazione di potenza elettrica;
- 28 Febbraio 2013: La prima generazione continua sulle 24 ore;
- 29 Aprile 2013: 1 MWh generato in 5 ore su un singolo cilindro di potenza (crediamo che sia il più alto picco di produzione elettrica compiuto da una macchina a moto ondoso);
- 29 Aprile 2013: 2 MWh generati in 13 ore e 50 minuti (funzione a cilindro singolo);
- 1 Luglio 2013: Durante le prove di miglioramento della prestazione, 1 MWh generato in 9 ore;
- Totale: circa 10 MWh generati in 144 ore di funzionamento.



Figura 4.3. Vista marina dell'Oyster in funzione all'EMEC

#### 4.1.2 Pelamis

Distanza dalla costa	Offshore
Principio di funzionamento	Attenuator
Power Take-Off	Sistema idraulico ad olio

Nel 2005, E.ON, la più grande azienda di gas e di elettricità del mondo, e uno dei principali produttori di rinnovabili del Regno Unito, formò una squadra di sviluppo apposita, per studiare le diverse tecnologie per il moto ondoso e l'energia maremotrice, e sviluppò un portfolio di progetti. Segnando il primo importante investimento nella potenza ondosa, la compagnia comprò una macchina Pelamis P2 di seconda generazione dalla Pelamis Wave Power Ltd nel 2009: la prima macchina per il moto ondoso al mondo ad essere acquistata da una compagnia di servizi[7].

##### *Principio di funzionamento*

Il Pelamis è un convertitore offshore di energia ondosa, che utilizza il moto delle onde per generare elettricità. La macchina opera con profondità del mare maggiori di 50m, ed è installata tipicamente 2-10 km dalla costa. La macchina ha una produzione nominale di potenza pari a 750kW, con un fattore di capacità del 25-40 %, in base alle condizioni del sito scelto per il progetto. In media, una

macchina fornisce potenza sufficiente per compensare il fabbisogno annuale di elettricità di circa 500 case. La macchina Pelamis è composta da cinque parti a tubo, collegate da giunti universali, che permettono la flessione in due direzioni. La macchina galleggia semi sommersa sulla superficie dell'acqua, e naturalmente si gira nella direzione delle onde. Mentre le onde passano per la lunghezza della macchina, e le parti flettono nell'acqua, il movimento viene convertito in elettricità, attraverso dei sistemi di power take-off alloggiati dentro ciascun giunto dei tubi della macchina, e la potenza viene trasmessa a riva, utilizzando cavi elettrici e un'apparecchiatura sottomarina standard. Ognuna delle unità di power take-off ai giunti della macchina è identica, e operano indipendentemente tra di loro con ridondanza di tutte le componenti principali. Il sistema di Power take-off è azionato da pistoni idraulici ai giunti, che si oppongono al moto ondoso dalle onde, e pompano fluido in accumulatori ad alta pressione, permettendo alla generazione di essere omogenea e continua. La macchina è connessa al suo ancoraggio e all'infrastruttura elettrica, attraverso un sistema brevettato di serraggio, situato alla fine del giogo dell'ormeggio. Questo sistema permette alla macchina di essere connessa e disconnessa dalla sua infrastruttura sottomarina velocemente, facilmente e in maniera sicura. Questa connessione/disconnessione della macchina Pelamis è un'operazione di routine, condotta come parte di un programma di operazione e di manutenzione[8].

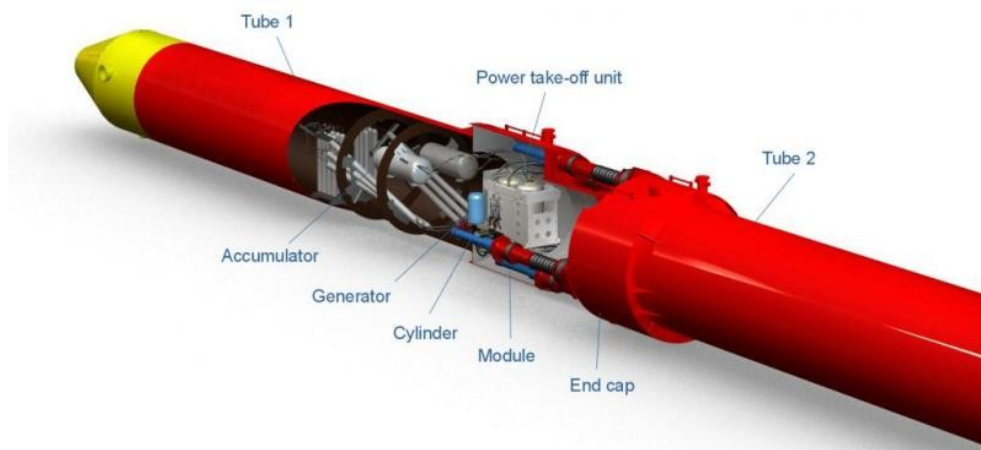


Figura 4.4. Componenti principali di una macchina Pelamis. Fonte Pelamis Wave Power





Figura 4.5. Componenti della macchina Pelamis P2 durante le operazioni di manutenzione. Fonte Pelamis Wave Power

### *Storia della ricerca*

Arrivando nelle Orkney nel Luglio 2010, la macchina P2 da 750 kW fu installata con successo al sito di prova delle onde di Billia Croo per la prima volta nell'Ottobre 2010. Il collaudo di tre anni è stato strutturato attraverso una serie di condizioni meteo, ognuna con altezza delle onde in crescita progressiva. Il P2 venne testato per un certo periodo di tempo in ogni stato prima di essere promosso al successivo. La revisione e il lavoro di manutenzione sono stati portati avanti a Lyness, dove è situata la macchina quando non si trova nel sito di prova, pronta per il reimpiego in periodi con clima più favorevoli. Nel primo accordo collaborativo di questo tipo, E.ON ha operato il dispositivo a fianco di una macchina P2 simile, posseduta dalla ScottishPower Renewables. Le due imprese hanno stretto un accordo lavorativo per massimizzare l'apprendimento della gestione, e del mantenimento delle macchine come con una wave farm[9]. E.ON ha deciso poi, nel 2013, di uscire dalla partnership con lo sviluppatore del Pelamis, dopo essersi preoccupata del fatto che la tecnologia innovativa non fosse abbastanza veloce nel progresso. Il gigante dell'energia ha collaborato con la Pelamis di Edinburgo, per testare il dispositivo all'EMEC nelle Orkney. Tuttavia, il progetto si arenò, dopo che E.ON annunciò, che concentrerà invece i suoi sforzi sulle risorse rinnovabili, quali l'eolico, il solare e le biomasse. In una frase, la compagnia disse che continuerà a monitorare le tecnologie per l'energia marina, e a lavorare per essere preparati, per quando l'energia marina sarà più matura. Un portavoce di Pelamis disse che i piani di impiegare il dispositivo a

serpente marino P2 all'EMEC, continuerà con il sostegno della ScottishPower Renewables. La decisione di E.ON in questa fase non influirà sullo sviluppo dei progetti di Pelamis Wave power. "I quali hanno confermato la loro intenzione di continuare con l'operazione della prima macchina P2 all'EMEC durante i prossimi mesi, a fianco dell'unità P2 posseduta dall'unità P2 ScottishPower Renewables[10].



Figura 4.6. Vista marina della macchine Pelamis P2 all'EMEC

#### 4.1.3 OE Buoy

Distanza dalla costa	Offshore
Principio di funzionamento	Oscillating Wave Column
Power Take-Off	Turbina ad aria

Nel Gennaio del 2013, la compagnia Ocean Energy, fu selezionata come fornitore del primo dispositivo da 50 milioni di euro, per il WaveHub, l'OE Buoy[1].

##### *Principio di funzionamento*

L'OE Buoy è stato progettato sul principio della colonna d'acqua oscillante (OWC). Per assicurare la capacità di sopravvivenza in mare, la piattaforma ha una sola componente mobile. La turbina sfrutta l'energia delle onde, e il

generatore converte questa energia in potenza elettrica. Il sistema di ormeggio mantiene l'OE Buoy nella sua posizione, ed è la chiave della sua capacità di sopravvivenza nella forza burrascosa dei venti e delle condizioni estreme del mare, probabilmente riscontrabili nei siti adatti al suo utilizzo[12].

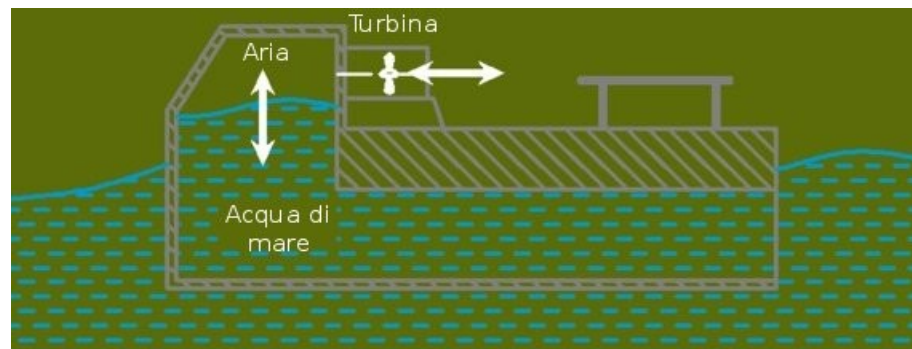


Figura 4.7. Principio di funzionamento dell'OE Buoy



Figura 4.8. OE Buoy in funzionamento in mare aperto

### *Sviluppo della ricerca*

Ocean Energy Limited, compagnia irlandese leader dell'energia ondosa, ha stretto un accordo storico, per fornire il sito di prova di energia marina offshore connesso alla rete più grande del mondo, il Wave Hub a Cornwall, con il suo primo dispositivo multimilionario per il moto ondoso. La Ocean energy con sede a Cork pensa di impiegare il suo primo dispositivo a grandezza naturale dal costo di €9 milioni al Wave Hub a largo della costa settentrionale di Cornwall

entro la fine di questo anno. La Ocean Energy ha testato un prototipo in scala 1:4 del suo OE Buoy a Galway Bay per tre anni. Le tempeste recenti nelle onde dell'Atlantico, hanno confermato la capacità di sopravvivenza dell'OE Buoy, quale piattaforma di generazione di potenza nelle condizioni più estreme. La compagnia con il suo partner tecnologico Dresser-Rand, il più grande fornitore di servizi nell'industria di petrolio e gas, era una delle diverse compagnie in gara con l'opportunità di vincere il contratto con Wave Hub. L'unità a grandezza naturale ha la capacità di generare energia sostenibile per alimentare fino a 1200 case. Wave Hub fianzierà i costi di investimento di Ocean Energy fino ad un massimo di £1 million (€1.2 million). Questo include il costo di assicurare una licenza marina e l'installazione di ormeggi e spiegamento[13].



Figura 4.9. OE Buoy nella fase di messa in opera

#### 4.1.4 Wavebob

Distanza dalla costa	Offshore
Principio di funzionamento	Point Absorber
Power Take-Off	Sistema idraulico ad olio

Il convertitore a energia ondosa Wavebob, è del tipo Point Absorber, progettato per convertire il moto ondoso in elettricità a basso costo per kWh, con le seguenti caratteristiche:

- Bassi investimenti di capitale e costi di manutenzione e di funzionamento;
- Produzione elevata di potenza elettrica media;



- Grande capacità installata, maggiore di 1MWe;
- Adattamento automatico alle condizioni ondose, in continuo cambiamento;
- Capacità di mantenere la posizione in mare;
- Risposta potente alle onde oceaniche di lungo periodo;
- Idoneità alla navigazione intrinseca della struttura galleggiante.

Le attività dimostrative della tecnologia sono state in opera per oltre dieci anni. Durante questo periodo sono state intraprese attività di prova e analisi teoriche, modellazioni numeriche e verifiche di prove in vasca. Questo percorso di sviluppo ha dimostrato che il WEC Wavebob ha la capacità di generare energia elettrica, dalla potenza ondosa assorbita, ed è pronto per una capacità installata di 1.5 MW in un sito del Nord Atlantico, con una potenza media prodotta di circa 500kW[14].

Il Wavebob è un punto assorbitore autoreagente assial-simmetrico, operante primariamente in modalità di sollevamento. E' progettato specificatamente per recuperare potenza utile dall'energia delle onde oceaniche, e per essere impiegato in grandi schiere offshore. Esso incorpora diverse caratteristiche molto innovative, protette da dei brevetti internazionali, che son stati assegnati alla società. Le seguenti vengono considerate caratteristiche chiave:

- **Abilità di sopravvivenza:** Il Wavebob è una struttura galleggiante assial-simmetrica su ormeggi allentati, che lo rendono intrinsecamente atto alla navigazione.
- **Risposta ad onde alte e con un lungo periodo:** Diversamente da tutti gli altri galleggianti altalenanti autoreagenti, la frequenza naturale del Wavebob può essere impostata per andar bene con le tipiche onde oceaniche (Atlantico 10", o Pacifico 15"), facilitando un buon assorbimento di energia. Esso può cavalcare onde molto grandi, continuando a recuperare potenza utile.
- **Regolazione e controllo:** Il Wavebob è predisposto per una regolazione quasi istantanea, e per aggiustamenti sul lungo periodo di frequenze naturali e di larghezza di banda. Il controllo autonomo a bordo è una caratteristica, e c'è una possibilità per l'implementazione di sistemi intelligenti, come per esempio la possibilità di avere unità individuali cooperanti in schiere. Queste sono caratteristiche molto significative nei climi ondosi mutevoli, come quelli del Nord Atlantico.
- **Accessibilità:** Il diametro esterno è di circa 20 metri, e l'altezza totale di circa 8 metri, che permette uno spazio adeguato al gruppo motopropulsore e ai sistemi di controllo sottocoperta. Nonostante sia una grande struttura galleggiante, il Wavebob è relativamente stabile in tutti i tipi di tempesta tranne le più forti.
- **Costi operativi e di manutenzione bassi, alta disponibilità:** I costi operativi e di manutenzione hanno una rilevanza enorme sui costi per kWh forniti. Vengono installati solo le componenti idrauliche marine e i

generatori ben testati. Il Wavebob tipicamente contiene tre o quattro serie di motori-alternatori, tutti o alcuni dei quali possono essere sfruttati, a seconda dell'energia ondosa incidente. La ridondanza incorporata, facilita il cambio da remoto e l'alta disponibilità, quando le condizioni meteo potrebbero precludere le visite di manutenzione. Il dispositivo principale rimane sul sito fino a 25 anni, con le componenti individuali sostituite e portate a riva per il servizio.

- Alta produzione di potenza: Potenza elettrica media di 500 kW e maggiore è prevista per i siti nel Nord Atlantico. La produzione di potenza sarà sincrona con bassi VAR[15].



Figura 4.10. Vista del WaveBob in mare

#### 4.1.5 Wello Oy

Distanza dalla costa	Offshore
Principio di funzionamento	Rotating Mass
Power Take-Off	Generatore elettrico

Fondata nel 2008, Wello Oy è una compagnia finlandese dedicata allo sviluppo di convertitori a moto ondoso. Avendo lavorato su diversi concetti a moto

ondoso sin dal 1976, il modello unico Penguin fu selezionato nel 2008 per un maggior progresso[16].

#### *Principio di funzionamento*

Il Penguin è progettato per catturare l'energia rotazionale, generata dal movimento del guscio di forma asimmetrica, che rotola, si alza e si abbassa e beccheggia, con ogni onda incidente. Questo movimento viene utilizzato per accelerare e mantenere le rotazioni di un volano rotante alloggiato nel guscio, che a sua volta aziona un generatore elettrico, per produrre elettricità, che viene poi trasmessa attraverso un cavo sottomarino. Il Penguin da 1600 tonnellate è lungo circa 30m, nove metri di altezza e ha un'immersione di circa sette metri. Solo due metri sono visibili sopra la superficie dell'acqua[17]. Il Penguin della Wello ha un design unico e naturale. Il contenitore da 220 tonnellate, esclusa la zavorra, viene tenuto sul posto da tre cavi ancorati al fondale marino sottostante. Il Penguin è progettato per essere semplice, affidabile ed estremamente duraturo per poter resistere alle condizioni dure dell'ambiente oceanico. La struttura esterna è composta di materiali riciclabili e resistenti. Tutte le componenti funzionali sono poste all'interno della copertura protettiva. Il Penguin è molto affidabile e richiede pochissima manutenzione lungo tutta la sua vita. Oltretutto ha un ciclo di vita più lungo di una centrale eolica media. Il Penguin ha il potenziale di produrre quantità di energia significative. Una singola unità di Penguin può produrre tra 0,5 e 1 MW elettrico[18].

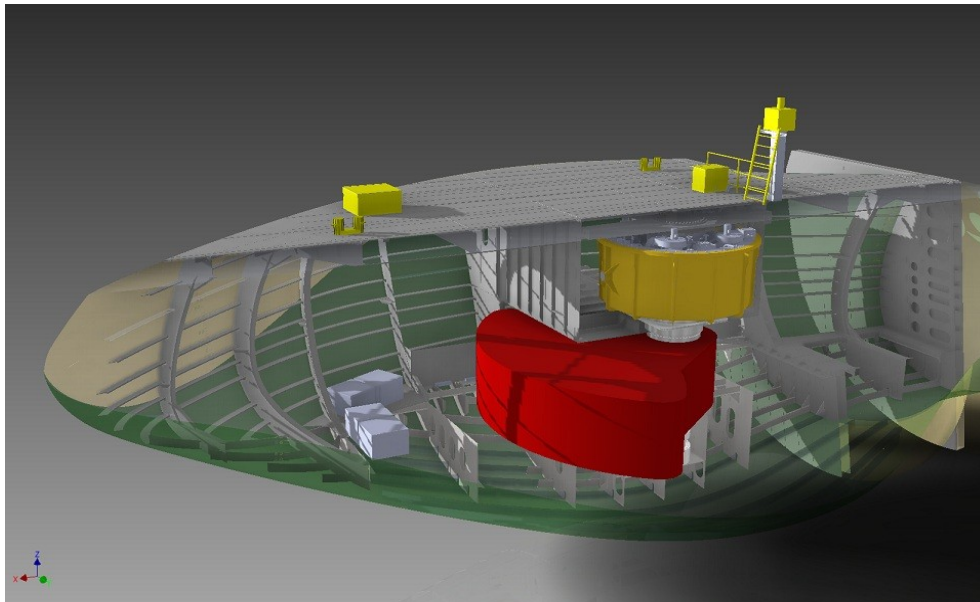


Figura 4.11. Vista d'insieme delle componenti interne al Penguin. Si nota il volano in rosso e il generatore in giallo



Figura 4.12. Penguin impiegato in mare aperto

#### *Storia della ricerca*

Sono stati costruiti e testati diversi modelli in scala del Penguin, con esiti favorevoli sia in laboratorio sia in mare. In questo arco temporale i dispositivi prototipali hanno gradualmente aumentato le dimensioni, finchè fu sviluppato il modello corrente da 500kW. Il dispositivo è stato messo in prova a Lyness sin dall'arrivo alle Orkney nel Giugno 2011, e fu impiegato prima di tutto al sito di prova di Billia Croo nell'estate del 2012. Nel Gennaio 2013 il dispositivo tornò a Riga, In Lettonia, per miglioramenti e manutenzione, e dovrebbe tornare in prova all'EMEC nel Maggio del 2013[19].



Figura 4.13. Vista del Penguin impiegato all'EMEC. Fonte Wello Oy

#### 4.1.6 Seatricity

Distanza dalla costa	Nearshore
Principio di funzionamento	Point Absorber
Power Take-Off	Turbina idroelettrica a bassa prevalenza

Seatricity è una nuova compagnia britannica dedicata allo sviluppo dei convertitori di energia ondosa.

##### *Principio di funzionamento*

Il concetto Seatricity include galleggianti multipli, che viaggiano su e giù con le onde, azionando le pompe per pressurizzare l'acqua di mare, che viene condotta a riva, per azionare una turbina idroelettrica standard, per produrre fino ad 1 MW di elettricità. Molte pompe individuali sono connesse assieme, per produrre una quantità sufficiente di acqua pressurizzata[20].



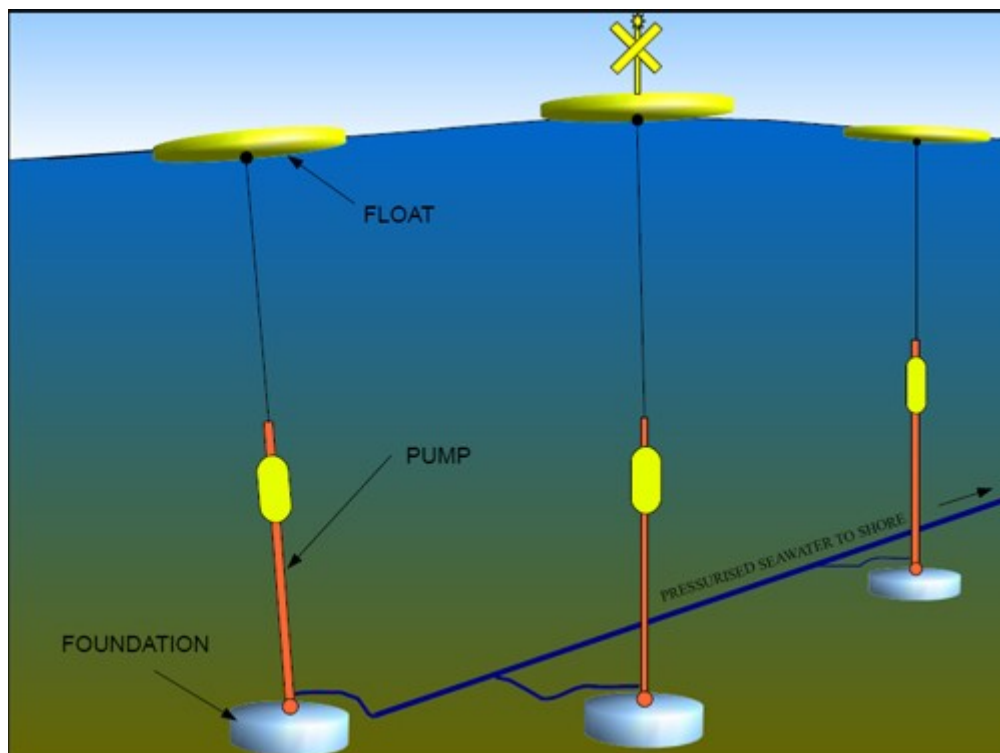


Figura 4.14. Principio di funzionamento della tecnologia Seatrivity. Fonte Seatrivity

#### *Storia della ricerca*

Avendo già testato un dispositivo prototipo in scala, nell'Oceano Atlantico al largo di Antigua, Seatrivity ha deciso di testare il prototipo a grandezza naturale, nelle condizioni più difficili del sito di prova Billia Croo. La compagnia costruì una fabbrica di manutenzione a Stromness nel 2011, dove vengono fabbricate le boe per il dispositivo. Il quale deve essere impiegato a Billia Croo nel 2013[21].



Figura 4.15. Componenti calleggianti dei dispositivi Seatricity

#### 4.1.7 WaveStar

Distanza dalla costa	Onshore, Nearshore
Principio di funzionamento	Point Absorber
Power Take-Off	Sistema idraulico a olio

Il concetto fu inventato dagli appassionati di vela Niela e Keld Hansen nel 2000. La sfida era di creare una produzione regolare di energia dai flutti oceanici e dalle onde intervallate 5-10 secondi. Questo fu raggiunto con una riga di galleggianti semi-sommersi, che si alzano e si abbassano a turno mentre passa l'onda. Questo permette che l'energia venga continuamente prodotta nonostante le onde siano periodiche. Il sistema di protezione dalle tempeste, garantisce la sopravvivenza della macchina al mare[22]. I galleggianti sono attaccati con delle braccia alla piattaforma che è fondata su dei pali fissati al fondal marino. Il movimento dei galleggianti è trasferito attraverso un sistema idraulico nella rotazione di un generatore, producendo elettricità. Le onde scorrono per la lunghezza della macchina, alzano a turno 20 galleggianti. Alimentando il motore e il generatore in questo modo permette una produzione continua di energia[23].



Figura 4.16. Centro di prova del WaveStar al DanWEC in fase di costruzione

#### 4.1.8 Wave Rotor

Distanza dalla costa	Nearshore
Principio di funzionamento	Nessuno
Power Take-Off	Turbina idraulica appositamente progettata

La turbina Wave Rotor ha combinato due differenti tipi di turbine su un singolo asse di rotazione. Il Wave Rotor è in grado di convertire non solo la potenza della corrente di marea, ma anche la potenza ondosa, in una rotazione dell'asse verticale della turbina. Il secondo è possibile perchè le onde sono composte da particelle d'acqua rotanti. Col fine di sfruttare l'energia cinetica delle onde, i seguenti due rotori sono combinati: un rotore Darrieus con palette di rotore più o meno verticali (o inclinate), e un rotore Wells, che ha le palette radiali orizzontali. L'energia delle maree e delle onde è direttamente convertita in un movimento rotazionale con l'asse centrale verticale, che aziona un generatore, il Power Take-Off (PTO). Perciò il sistema non ha bisogno di nessun passaggio



meccanico secondario inefficiente o di conversione di potenza idraulica. Questi due rotori sono rispettivamente un Darrieus omnidirezionale ad asse orizzontale, e un rotore Wells bidirezionale ad asse verticale, che sono conosciuti per operare in correnti fluttuanti. Le prove sul modello hanno mostrato, che la prestazione delle trurbine Darrieus e Wells, combinate assieme in una singola turbina Wave Rotor, supera la somma delle prestazioni delle singole tecnologie. Questa combinazione impone al Wave Rotor le sue caratteristiche uniche:

- Prestazione omnidirezionale della turbina;
- Auto avviamento da 0,7 m/s o 1,5 nodi;
- Rotazione monodirezionale.

Questa costruzione semplice e leggera, eppure robusta, ha il vantaggio aggiuntivo di avere una piccola superficie esposta nel mare, perciò riducendo i carichi in condizioni estreme di tempesta[24].

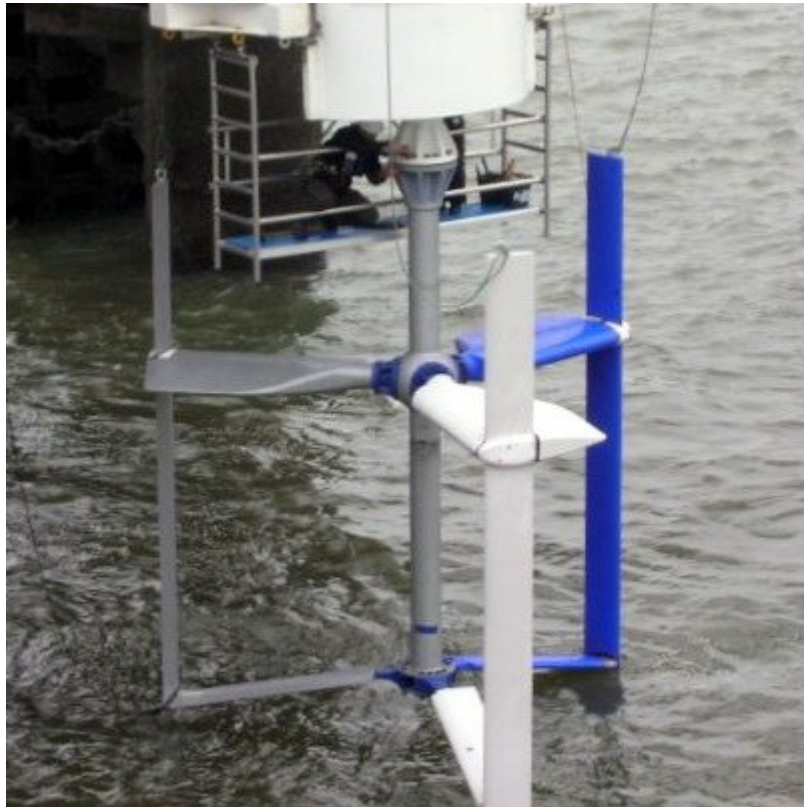


Figura 4.17. Vista ravvicinata delle pale del Wave Rotor, Fonte IHC Merwede

#### 4.1.9 Power Buoy

Distanza dalla costa	Offshore, Nearshore
----------------------	---------------------

Principio di funzionamento	Point Absorber
Power Take-Off	Trasmissione diretta

Il sistema di generazione ondosa di OPT PowerBuoy, utilizza un galleggiante d'alto mare, intelligente, per catturare e convertire l'energia ondosa in elettricità a basso costo e pulita. La salita e la discesa delle onde al largo, causa al galleggiante, di muoversi liberamente su e giù. Il movimento meccanico risultante, viene convertito attraverso un power take-off sofisticato, per azionare un generatore elettrico. La potenza ondosa generata, viene trasmessa a riva attraverso un cavo elettrico sottomarino. Una stazione elettrica OPT ha un profilo superficiale molto basso ed è difficilmente visibile dalla costa. Dei sensori sul PowerBuoy monitorano continuamente la prestazione dei vari sottosistemi, e dell'ambiente oceanico circostante. I dati vengono trasmessi alla costa in tempo reale. Nel caso di onde molto grandi imminenti, il sistema automaticamente si blocca e cessa la produzione di potenza. Quando l'altezza dell'onda ritorna normale, il sistema si sblocca e ricomincia la produzione di energia e la trasmissione di energia elettrica a riva. Il Mark 3 PowerBuoy aziona un generatore con un picco di 866 kW. Fattori di capacità tipici per un Mark 3 variano tra 30% e 45%, a seconda della posizione[25].



Figura 4.18. Power buoy Mark 3 impiegato nel sito di Santona

### *Sviluppo della ricerca*

Il primo Mark 3 PowerBuoy a grandezza naturale, fabbricato in Scozia, fu impiegato nel 2011 al largo della costa scozzese per prove oceaniche. Un secondo Mark 3 PowerBuoy è in costruzione a Portland, nell'Oregon, dove verrà impiegato. L'impiego del primo Mark 3 PowerBuoy, in Scozia, nel Mare del Nord, segnò un'importante tappa nello sviluppo commerciale della società. Il Mark 3 PowerBuoy offre molte caratteristiche per i progetti a moto ondoso. Esso genera elettricità con altezze dell'onda tra 1 e 6 metri. L'ormeggio della OPT e la struttura del PowerBuoy, permettono l'impiego del sistema lungo una vasta gamma di combinazioni di condizioni di tempesta, di marea e di correnti, rendendolo adatto per un grande campo di climi ondososi. Il Mark 3 è tipicamente configurato in schiere di due o tre righe, minimizzando così l'impronta del

progetto. OPT sta sviluppando il PowerTower, un PowerBuoy Mark 4 che dovrà azionare un generatore di 2.4MW di picco. Il Dipartimento dell'Energia statunitense (DOE) e il Governo inglese stanno finanziando diversi stadi del programma di sviluppo del Mark 4[26]. Il PowerBuoy ci si aspetta dimostri significativi miglioramenti nel sistema di messa a punto elettronico, proprietario di OPT, che permetta al PowerBuoy di migliorare l'efficienza di conversione dell'energia. Questo progetto, chiamato WavePort, viene condotto da OPT in vicina associazione con un gruppo di compagnie ed istituzioni europee[27].



Figura 4.19. Installazione del PowerBuoy nel sito di Santona

Tabella 4.1. Specifiche del progetto Santona[28]

Posizione	Costa settentrionale, Spagna
Capacità totale di generazione	Fino a 1.39 MW. Mark 3 PowerBuoy
Capacità totale di generazione	Fino a 1.39 MW. Mark 3 PowerBuoy equipaggiati con generatori di 866 kW di picco
Specifiche del Buoy	Mark 3
Applicazione	Connesso alla rete

Componenti principali	1 prototipo PowerBuoy; 9 Mark 3 PowerBuoy; 1 stazione ausiliaria sottomarina a capsula (USP); cavo sottomarino (6 km)
-----------------------	---

#### 4.1.10 Wave Pioneer

Distanza dalla costa	Offshore
Principio di funzionamento	Point Absorber
Power Take-Off	Generatore elettrico

Il Wave Pioneer funziona con la tecnologia del Point Absorber. E' costituito da un corpo galleggiante che è ancorato con un cavo al fondale marino, segue i movimenti delle onde e trasforma il movimento lineare di salita e discesa in un movimento rotazionale dell'argano. L'energia meccanica viene trasformata in elettrica, attraverso l'uso di due motori ubicati all'interno della boa, che funzionano da generatori[29].

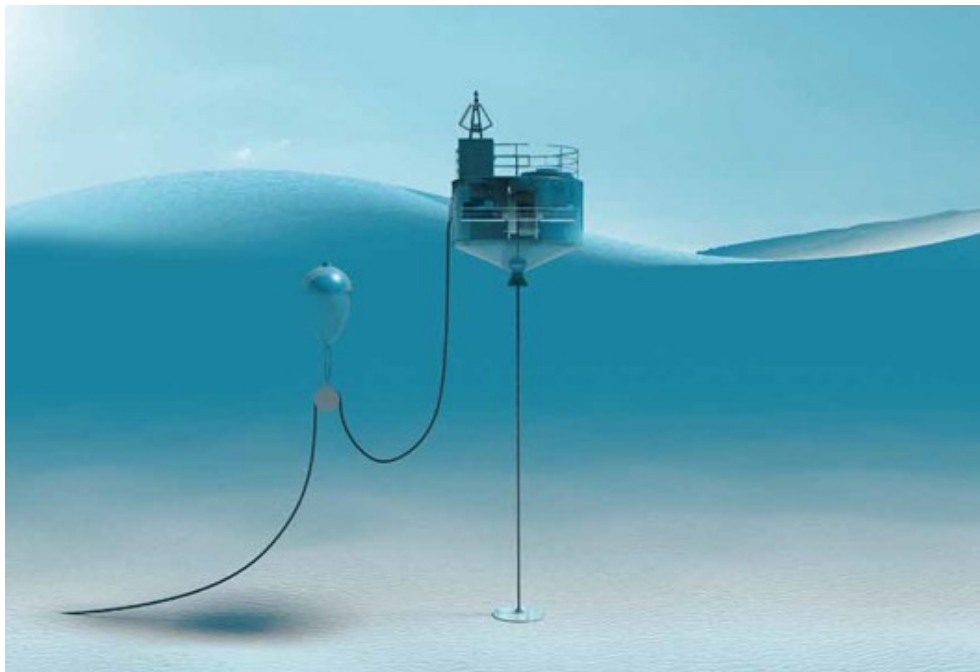


Figura 4.20. Vista schematica di profilo del WavePioneer

#### 4.1.11 CETO

Distanza dalla costa	Nearshore
Principio di funzionamento	Point Absorber
Power Take-Off	Turbina idroelettrica

Questi dispositivi hanno una caratteristica unica rispetto agli altri sistemi a Point Absorber, in quanto sono completamente sommersi. Una pompa idraulica è racchiusa in un'asta, che è ancorata al fondale marino. La boa è legata all'altro estremo della pompa. Mentre la boa si muove nelle onde, la pompa pressurizza l'acqua di mare e la pompa verso terra dove si produce acqua desalinizzata ed elettricità dato che l'acqua pompata rimanente è alimentata in una turbina idroelettrica[30].

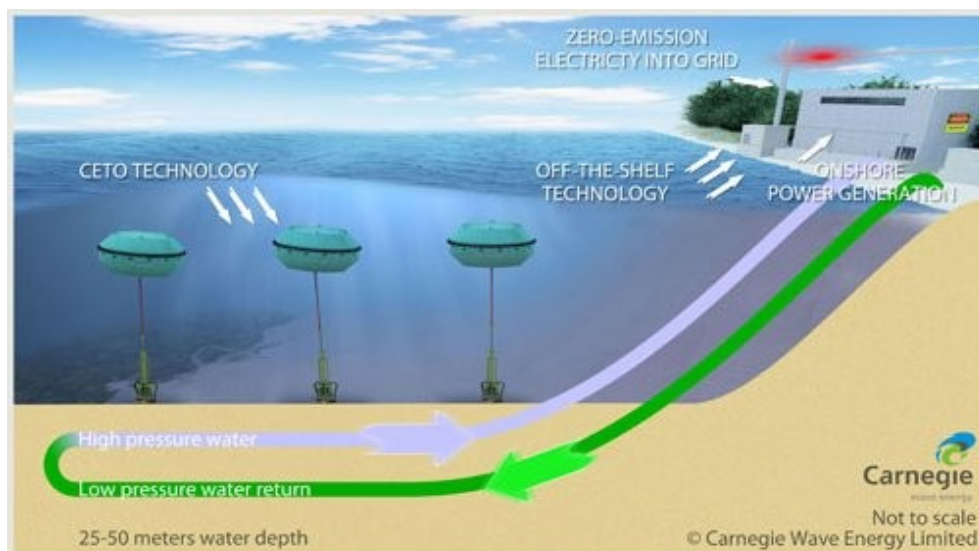


Figura 4.21. Schema di funzionamento della tecnologia CETO per la sola produzione di energia elettrica. Fonte Carnegie

#### 4.1.12 Langlee

Distanza dalla costa	Offshore, Nearshore
Principio di funzionamento	Oscillating wave surge converter
Power Take-Off	Generatore elettrico a magneti permanenti

Il convertitore di energia ondosa Langlee è stato progettato seguendo un'idea di semplicità. L'unità WEC è una struttura galleggiante d'acciaio, con delle ali leggere che oscillano con le onde e generano elettricità, che viene trasmessa alla



rete con un cavo elettrico. Il WEC è stato progettato per essere dimensionato in schiere, che possono produrre diversi megawatt di elettricità. La struttura del WEC è basata su dei moduli, così da rendere la fabbricazione e il trasporto più convenienti, per permettere la costruzione e l'equipaggiamento agli impianti vicini al sito d'installazione, senza il bisogno di gru costose, sommozzatori o veicoli operati da lontano[31]. Le ali d'acqua dondolano avanti e indietro con le onde. Le forze enormi delle onde applicate alle ali d'acqua da 65 m<sup>2</sup> sono convertite in energia elettrica da generatori a magneti permanenti connessi ad esse. L'elettricità è resa conforme alla rete per mezzo dell'elettronica di potenza, e viene alimentata nella rete con un cavo sottomarino. Il sistema di controllo del motore aggiusta continuamente la coppia del generatore, per ottimizzare la produzione energetica. In condizioni climatiche dure, la coppia è automaticamente ridotta per minimizzare lo stress sulla struttura d'acciaio[32]. Il Robusto di Langlees è una soluzione energetica conveniente competitiva con l'elettricità dei generatori diesel, anche per progetti piccoli. Nelle installazioni più grandi, la tecnologia diventa competitiva con l'eolico offshore e, entro tre anni, sarà al livello dei costi dell'eolico terrestre[33].

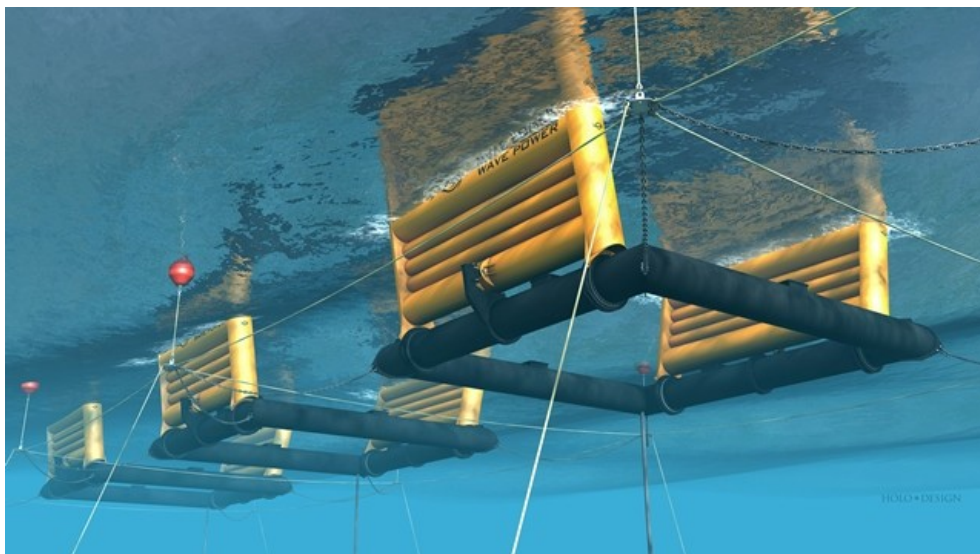


Figura 4.22 Grafica di un impianto composto da macchinari Langlee multipli.  
Fonte Langleewave

#### 4.1.13 WaveRoller

Distanza dalla costa	Nearshore
Principio di funzionamento	Oscillating wave surge converter
Power Take-Off	Sistema idraulico a circuito chiuso

Il WaveRoller è un dispositivo che converte le onde oceaniche in elettricità. La macchina opera nelle aree vicino alla costa (approssimativamente 0.3-2 km dalla costa) a profondità tra gli 8 e 20 metri. E' completamente sommerso e ancorato al fondale marino. Una singola unità WaveRoller (un pannello), è classificata tra i 500kW e 1000kW, con un fattore di capacità del 25-50% a seconda delle condizioni ondose del sito di progetto. La semplice idea per il progetto del WaveRoller venne in un momento di ispirazione, quando il sommozzatore professionista finlandese Rauno Koivusaari stava esplorando un relitto. Lui notò che un pezzo piatto molto pesante del corpo della barca si muoveva avanti e indietro, mosso dalle ondate energetiche sotto la superficie dell'acqua, dovute alle onde oceaniche. Da quella prima intuizione il progetto del WaveRoller è passato attraverso numerosi cicli di costruzione di prototipi, testandoli nei laboratori, conducendo simulazioni molto sofisticate e modellazioni numeriche, e finalmente, impiegando i dispositivi di prova in un ambiente oceanico reale, per fare osservazioni, aggiustare la scala e ripetere il ciclo di sviluppo[34].

#### *Principio di funzionamento*

Il WaveRoller si comporta essenzialmente nella stessa maniera della parte piatta del relitto che Rauno osservò. Il movimento avanti e indietro dell'acqua spinto dai flutti delle onde pone il pannello composito in movimento. Per massimizzare l'energia che il pannello del WaveRoller può assorbire dalle onde, il dispositivo viene installato sotto l'acqua a profondità di circa 8-20 metri, dove i flutti delle onde sono più potenti. Il pannello attraversa quasi per intero la profondità della colonna d'acqua dal fondale marino senza infrangere la superficie. Questo assicura che il pannello non si sporga sul paesaggio marino e previene la creazione di inefficienze materiali, che apporrebbero un carico aggiuntivo alla struttura. Mentre il pannello del WaveRoller si muove e assorbe l'energia delle onde oceaniche, il pistone idraulico, attaccato al pannello, pompa i fluidi idraulici dentro un circuito idraulico chiuso. Tutti gli elementi del circuito idraulico sono racchiusi dentro una struttura ermetica, dentro il dispositivo, e non sono esposti all'ambiente marino. Di conseguenza, non c'è pericolo di perdite nell'oceano. I fluidi ad alta pressione vengono alimentati nel motore idraulico, che aziona un generatore elettrico. La produzione di elettricità da questa centrale a moto ondoso viene poi trasmessa alla rete elettrica attraverso un cavo sottomarino. La produzione di potenza di un singolo dispositivo WaveRoller, o in altre parole di un singolo pannello, spazia tra i 500 e i 1000 kW. Le differenze nella produzione di potenza dipendono dalle risorse locali di onde. Quando dei dispositivi WaveRoller multipli vengono installati in un singolo sito, si parla di centrale a moto ondoso, o wave farm. Queste centrali possono contenere decine di dispositivi, così che parte dell'infrastruttura del sito



sia distribuita tra le macchine, perciò riducendo il costo di un'unità individuale. Dato che ogni WaveRoller è attrezzato con un generatore elettrico a bordo, la produzione di molti dispositivi può essere combinata con cavi elettrici e una sottostazione. Grandi centrali a moto ondoso hanno la capacità nominale di una centrale elettrica di grandezza media. Una delle caratteristiche uniche del WaveRoller, che assicura la sua efficacia di costo nel fornire una produzione sicura di elettricità, è il suo distintivo concetto di funzionamento e di manutenzione. Le unità di WaveRoller comprendono grandi vasche di zavorra che vengono riempite con aria così che possano essere fatte galleggiare nel sito d'impiego. Queste vasche possono essere inondate d'acqua per sommergere l'unità. Anche se il convertitore a moto ondoso rimane completamente sommerso durante il funzionamento regolare, può essere facilmente reso galleggiante sulla superficie per la manutenzione, svuotando le vasche di zavorra. Non c'è bisogno di operazioni d'immersione complesse, costose e potenzialmente pericolose per fare la manutenzione al WaveRoller. In aggiunta, il dispositivo può essere installato o revisionato senza un'attrezzatura aggiuntiva costosa, come grandi gru o barconi di sollevamento. La produzione di elettricità da un pannello singolo di WaveRoller viene trasmessa verso un hub o una sottostazione, rendendo semplice inserire nuove unità in stadi separati di sviluppo del progetto, per introdurre capacità aggiuntive alla centrale a moto ondoso. Il progetto modulare delle unità, comporta che qualsiasi potenziale sottoprestazione, o pausa di revisione e di manutenzione, non abbiano alcun impatto sui dispositivi restanti, assicurando una produzione di potenza ininterrotta della centrale a moto ondoso[35].

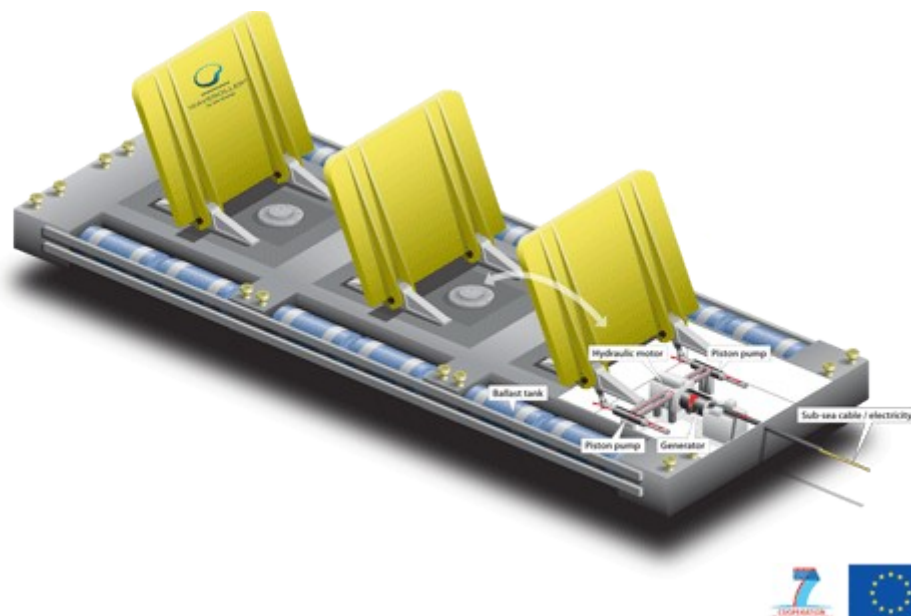


Figura 4.23 Set di tre moduli di WaveRoller. Fonte WaveRoller

#### 4.1.14 Wave Dragon

Distanza dalla costa	Offshore, Nearshore
Principio di funzionamento	Overtopping device
Power Take-Off	Turbine idroelettriche a bassa prevalenza

Il Wave Dragon è un convertitore a moto ondoso galleggiante, della tipologia a Overtopping, che può essere impiegato in una singola unità o in uno schieramento di unità Wave Dragon, risultanti in una centrale a moto ondoso, con una capacità paragonabile alle centrali tradizionali a combustibili fossili. Il primo prototipo connesso alla rete, è ora impiegato a Nissum Bredning, in Danimarca. Le prove a lungo termine vengono portate avanti, per determinare la prestazione del sistema; quali per esempio la disponibilità, e la produzione di elettricità in diversi stati del mare[36].

##### *Principio di funzionamento*

Il dispositivo Overtopping Wave Dragon eleva le onde oceaniche ad un bacino sopra il livello del mare, dove l'acqua viene fatta uscire attraverso diverse turbine, producendo così elettricità. Il Wave Dragon è una costruzione molto semplice e ha un solo tipo di parte in movimento: le turbine. Questo è essenziale per qualsiasi dispositivo dedicato al funzionamento offshore, dove le forze estreme colpiscono tutte le parti in movimento. L'acqua che sovrasta il Wave Dragon è immagazzinata temporaneamente in un grande bacino, creando così una prevalenza, ovvero la differenza tra la superficie dell'acqua del mare e la superficie dell'acqua del bacino. Quest'acqua viene fatta uscire dal bacino del Wave Dragon, attraverso diverse turbine, così generando elettricità come in una centrale idroelettrica. Quando le onde raggiungono i riflettori, si elevano, e si riflettono verso la rampa aumentando la quantità di acqua immagazzinata nel bacino, ed aumentando perciò la produzione possibile di energia. Sia la rampa a doppia curva sia i riflettori di onda sono stati brevettati. Il Wave Dragon è costruito con delle camere d'aria, in cui il sistema ad aria pressurizzata rende l'altezza del galleggiante del Wave Dragon regolabile. Questo viene utilizzato per la regolazione in base alle altezze variabili delle onde, in quanto l'efficienza del superamento dipende dalla scelta della giusta altezza della rampa. La generazione elettrica del wave Dragon si basa sull'energia potenziale dell'acqua che supera la rampa, e viene temporaneamente immagazzinata nel bacino. Questo bacino contiene circa 8000 m<sup>3</sup> d'acqua che deve essere fatta uscire attraverso le turbine tra due onde. Il Wave Dragon utilizza turbine idraliche con

distributore a pale fisse, che sono una tecnologia matura e largamente provata, che è stata usata nelle centrali idroelettriche per più di ottant'anni. Una turbina speciale, di piccola taglia a bassa prevalenza è stata sviluppata per un uso possibile nel Wave Dragon. La rotazione delle turbine idraliche è trasformata in elettricità con un generatore a magneti permanente (PMG) su ciascuna turbina. I generatori PMG sono scelti per evitare il quadro elettrico utilizzato con un generatore asincrono. I tifoni vengono gestiti abbassando la struttura appena al di sopra del livello del mare[37].



Figura 4.24 Vista del Wave Dragon in mare aperto. Al centro si ha il bacino di stoccaggio dell'acqua. Fonte Wave Dragon

#### *Corpo principale*

Il peso totale in acciaio del corpo principale più la rampa è di 150 t. Per ottenere le 237 tonnellate desiderate come peso totale, si aggiungono 87t di zavorra d'acqua. In un clima ondoso di 36 kW/m il corpo principale è di 140 x 95 metri. Costruito in una combinazione di acciaio e cemento rinforzato. In cima al corpo principale del Wave Dragon c'è il bacino d'acqua. Sul prototipo di prova Nissum Bredning c'è un bacino di 55 m<sup>3</sup>. Sul Wave Dragon da 36 kW/m questo equivale a 8,000 m<sup>3</sup>[38].

#### **4.1.15 AWS-III**

Distanza dalla costa	Offshore, Nearshore
Principio di funzionamento	Submerged pressure differential
Power Take-Off	Turbina ad aria

AWS-III è un convertitore a moto ondoso composto da uno schieramento multi-cella di assorbitori a membrana flessibile, che convertono la potenza ondosa in potenza pneumatica attraverso la compressione di aria in ogni cella. Le celle sono interconnesse, permettendo perciò lo scambio di aria tra le celle durante la contro fase. Un sistema turbina-generatore in serie, è implementato per convertire la potenza pneumatica in elettricità. Un tipico dispositivo comprenderà una schiera di 12 celle, ognuna larga 16m e profonda 8, disposte attorno a una struttura circolare, con un diametro totale di 60m. Questo tipo di dispositivo è in grado di produrre una media di 2.5MW da un mare mosso, con una struttura in acciaio del peso di meno di 1300t. L'AWS-III verrà ormeggiato in acque profonde 100m usando ormeggi standard. I dispositivi verranno disposti in schiera o 'farm' di diverse centinaia di MW. Ogni AWS-III verrà connesso a una sottostazione centrale offshore, attraverso un cavo elettrico ad alta tensione. I sistemi ausiliari sono alloggiati dentro l'ambiente dello scafo, e perciò sono entrambi protetti dall'ambiente, e sono disponibili per una manutenzione pratica e un'ispezione. L'AWS-III è progettato per l'impiego in condizioni oceaniche, in profondità delle acque tra i 70 e i 150m. La produzione media su un periodo di 15 minuti, in condizioni del mare dettate da  $H_s$  pari a 5m e  $T_z$  di 9s, è maggiore di 2.5MW. I nostri modelli stimano un fattore di capacità del 25% per un dispositivo da 2.5MW, impiegato in una risorsa di 44kW/m, che indica una produzione annuale media di circa 5.1GWh per dispositivo. Il programma di AWS Ocean Energy è[39]:

Tabella 4.2 Programma di sviluppo dell'AWS-III

Anno	Obiettivo
2011	Completare i test sulla prestazione e sul progetto delle singole celle
2012	Completare le prove sulle singole celle
2013	Costruire un prototipo a 12 celle da 2.5MW
2014	Testare il prototipo in acque aperte
2015	Iniziar eil lavoro sullo schieramento dimostrativo da 10MW (4 macchine AWS-III)

2016	Impiego dello schieramento da 10MW
------	------------------------------------



Figura 4.25 Grafica di una wave farm di convertitori AWS-III. Fonte AWS Ocean Energy

## 4.2 Tecnologia italiana

In Italia sono stati avviati numerosi progetti di ricerca, per l'ideazione di una tecnologia innovativa nel campo dell'energia ondosa. I WEC progettati, hanno il comune denominatore di saper sfruttare i bassi livelli di densità energetica del Mar Mediterraneo, e, allo stesso tempo, non hanno limitazioni per un impiego nei climi ondososi più energetici dell'oceano. I seguenti convertitori sono i più promettenti:

### 4.2.1 Iswec

Distanza dalla costa	Offshore, Nearshore
Principio di funzionamento	Rotating Mass
Power Take-Off	Generatore elettrico

L'ISWEC è un dispositivo giroscopico di conversione dell'energia, capace di sfruttare l'inclinazione e la frequenza delle onde. Galleggia tramite uno scafo progettato apposta per garantire la stabilità e un'ottima sincronizzazione alle lunghezze d'onda proprie del sito d'installazione, infatti il sistema giroscopico inerziale genera energia in condizioni di risonanza. L'installazione del galleggiante non necessita ormeggi rigidi o fondamenta sul fondale marino. Una delle caratteristiche più versatili dell'Iswec è la sua scalabilità in alto, ovvero può essere sfruttato sia negli oceani sia in mari chiusi come il Mediterraneo. Uno scafo di supporto, progettato apposta per incrementare il movimento di

beccheggio del dispositivo, permette di estrarre il più alto livello di potenza ondata disponibile. Il concetto dietro al progetto dello scafo dell'Iswec, è parzialmente opposto alla classica metodologia di progetto delle imbarcazioni, dove si cerca di minimizzare gli effetti della dinamica delle onde sul comportamento delle barche. Il progetto dell'Iswec, si basa su considerazioni di funzionamento e ambientali, che garantiscono al convertitore il più alto livello di affidabilità e fattibilità durante il suo ciclo di vita. Infatti il dispositivo garantisce accesso diretto per le operazioni di manutenzione e non ha nessuna parte in movimento esposta all'ambiente marino. Di conseguenza non ha alcun impatto sulla flora e sulla fauna marina, limitando le parti sommerse del dispositivo[40].

#### *Principio di funzionamento*

L'asse di rotazione del volano è parallelo all'asse verticale dell'intero dispositivo. Un motore elettrico alimenta il disco, e garantisce un'alta velocità rotazionale al volano. Quando arriva un'onda dalla prua, un'oscillazione di beccheggio viene imposta al sistema inerziale. Gli effetti giroscopici, perciò, producono un movimento di rollio del volano. Questa rotazione viene estratta da un generatore elettrico. L'Iswec si basa su una tecnologia avanzata e durevole creata per l'offshore e per altre applicazioni rinnovabili. Lo scafo e il sistema di ormeggio, attingono direttamente dall'ingegneria marina offshore, mentre per la parte elettrica del sistema di conversione, diverse componenti eoliche vengono adottate, per beneficiare della qualità testata e dell'affidabilità di queste tecnologie. Ogni componente è stato progettato su diverse scale, per rispondere alle richieste dei vari mercati identificati[41].

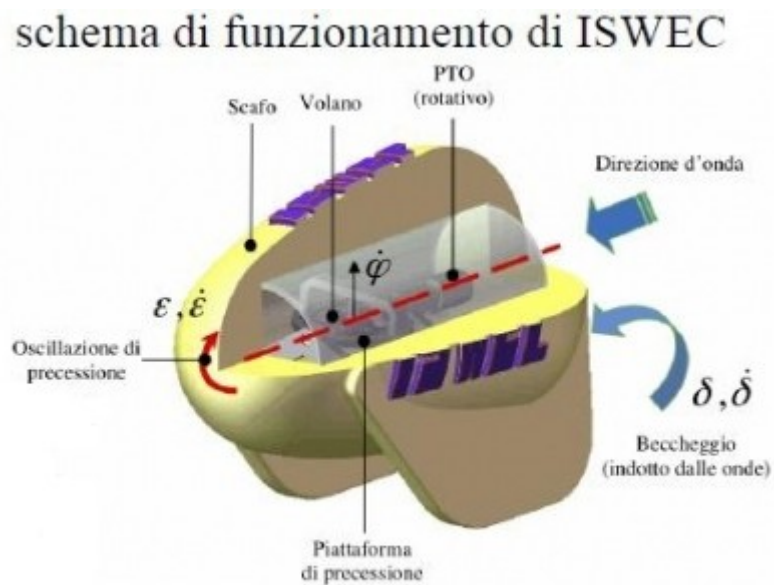


Figura 4.26. Schema di funzionamento dell'Iswec. Fonte Iswec

#### 4.2.2 40SouthEnergy

Distanza dalla costa	Offshore, Nearshore
Principio di funzionamento	Attenuator
Power Take-Off	Generatore elettrico

I convertitori di energia ondosa della 40South Energy sono costituiti da una parte completamente sommersa, chiamata membro inferiore, e da intercettori di energia, chiamati membri superiori, a diverse profondità. Il movimento relativo dei membri inferiore e superiore è convertito direttamente in elettricità dalla macchina. La profondità del dispositivo viene controllata automaticamente per rispondere dinamicamente alle condizioni del mare. Questa abilità di variare la profondità in maniera dinamica, automaticamente in risposta a qualsiasi cambiamento nello stato del mare, garantisce anche che le stesse macchine possano operare in tutto il mondo. Sia che l'installazione si trovi nelle Orkney, in Toscana, o in Oregon, la macchina funzionerà entro gli stessi limiti operativi. A causa del fatto che le macchine di conversione di energia ondosa rimangono sotto la superficie dell'acqua, e che regolano la loro profondità automaticamente, ciò comporta che:

- Le macchine a moto ondoso non vengono interessate nemmeno dalle condizioni climatiche peggiori;

- Esse mantengono un livello di efficienza molto alta;
- Rispondono automaticamente in tempo reale alle condizioni prevalenti del mare;
- I dispositivi non pongono alcun problema alla navigazione in superficie;
- L'impatto ambientale è trascurabile;
- La manutenzione delle macchine può essere compiuta sulla superficie[42].

### *Macchina R115*

L' R115/150kW è ora l'offerta principale di 40South Energy. E' un dispositivo relativamente piccolo, con il Membro Inferiore che comprende due binari ciascuno di 36m, e di un Membro Superiore di 115 metri cubici. L'ormeggio è formato da due basi a gravità, sui lati opposti rispetto alla macchina. L'installazione consiste in un posizionamento preliminare delle basi a gravità, che sono auto-galleggianti, e in seguito al posizionamento della macchina. Tutto il processo può essere portato avanti in uno o due giorni. L'obiettivo per queste macchine, per i carichi disconnessi dalla rete, sono le isole o le comunità isolate, con un consumo energetico medio nell'ordine di 150kW o più, se nessun immagazzinamento di energia è possibile. Se lo stoccaggio di energia o un uso flessibile di potenza fossero disponibili, allora la macchina è utile anche in situazioni dove il consumo medio è minore di 150kW. Le macchine possono essere installate in schiere, per aumentare la produzione di potenza, sia in una configurazione connessa alla rete, sia disconnessa. La produzione è sensibilmente più stabile di quella delle turbine eoliche. Le macchine R115 possono essere effettivamente usate in una situazione in cui la potenza di picco viene artificialmente limitata a 75kW (configurazione "Series 75", indicata come R115/150-S75). In questo caso i fattori di capacità attesi, considerandola come macchina da 75kW, aumentano al 35%-45% in condizioni di Mediterraneo, e al 60%-85% in condizioni oceaniche[43].



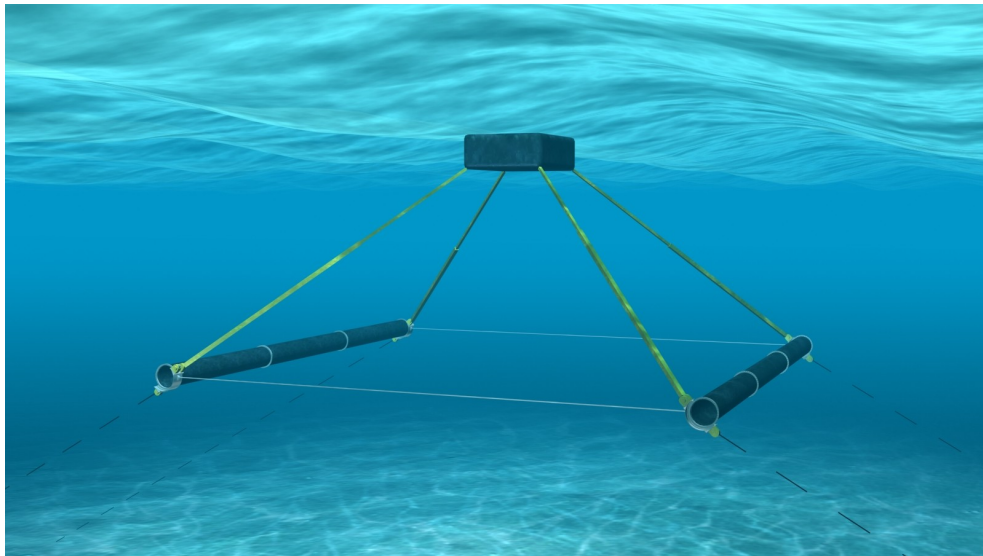


Figura 4.27. Grafica del dispositivo R115. Si notino i membri inferiori e il membro superiore.

### 4.2.3 Progetto Agire

Il progetto analizza l'utilizzo delle onde del mare per produrre energia elettrica, o idrogeno a basso costo o acqua desalinizzata, senza produrre CO<sub>2</sub>. A Venezia si vuole utilizzare il moto ondoso quale fonte rinnovabile per la produzione di energia elettrica. Il Comune di Venezia tramite AGIRE, Agenzia Veneziana per l'Energia, con la collaborazione di privati che detengono dei brevetti propri, tra cui la tecnologia GIANT e WEM, sta supportando tale progetto di sperimentazione, di utilizzare le onde del mare per generare energia rinnovabile. Il progetto ha portato alla realizzazione di 3 prototipi, 2 da installare in mare aperto e uno già installato in laguna[44].

#### *Giant*

Distanza dalla costa	Nearshore
Principio di funzionamento	Point Absorber
Power Take-Off	Generatore elettrico lineare

Il GIANT (Generatore Integrato Autonomo Non Tradizionale) trasforma direttamente l'energia potenziale delle onde in elettricità, usando un sistema elettronico e un generatore speciale. Le sue prestazioni permettono un rientro degli investimenti in minor tempo rispetto agli altri sistemi che sfruttano il moto ondoso e anche rispetto all' eolico o all'idroelettrico. Si può anche incrementare

la potenza installata in un secondo momento perché il sistema è modulare. L'impatto ambientale è minimo, non servono fondazioni o tralicci, non vi è rumore, non si usano materiali inquinanti, si vede solo un semplice galleggiante. Il Giant con una parte fissa chiamata statore, montata sulla parte statica del gruppo, e una parte mobile chiamata rotore, montata sul galleggiante, produce elettricità in bassa frequenza. I sistemi attuali non possono, per la bassa velocità delle onde, produrre elettricità, la frequenza delle onde è in media una ogni 5 secondi. Questa elettricità in bassa frequenza viene trasmessa ad un alimentatore, che la trasforma in corrente continua, e da questo a un inverter che la porta a 220V (o 380V trifase) della rete Enel per la vendita o l'utilizzo in loco. A metà di questo processo, con un impianto semplificato, è possibile ottenere idrogeno low cost il tutto senza emissione di anidride carbonica. E' in progetto l'installazione di un sistema di produzione di energia maremotrice da 1,5 KW nominali presso il CNR di Venezia[45].

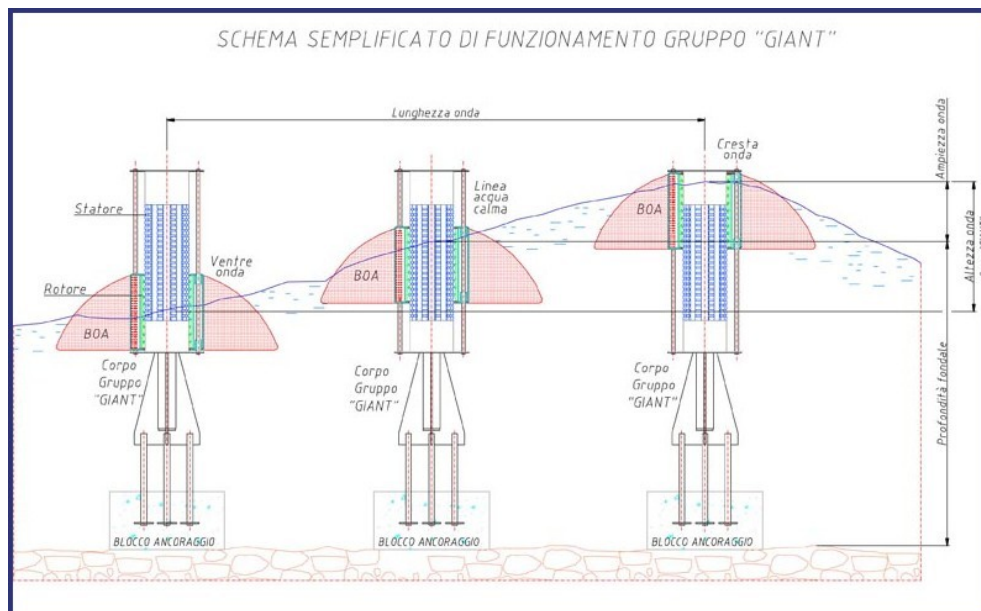


Figura 4.28. Schema di funzionamento del GIANT. Fonte giantgiem.it

*WaveEnergyModule*

Distanza dalla costa	Nearshore
Principio di funzionamento	Point Absorber
Power Take-Off	Generatore elettrico

Il WEM, Wave Energy Module, protetto da un brevetto internazionale, è un sistema modulare che fu progettato per estrarre energia dalle onde del mare. Ogni modulo ha al centro una struttura d'acciaio con braccia, alle quali sono attaccate sei dispositivi galleggianti di 1000 kg ciascuno, parzialmente riempiti con acqua. Assieme, formano una struttura a forma di ragno. Il modulo centrale è circa 6 metri di diametro e pesa circa 1400 kg. Dentro la struttura centrale, c'è un generatore elettrico da 7 kW. La struttura è posizionata a un livello di mare medio (considerando le maree) e viene attaccata o ancorata al fondale del mare per garantire la resistenza contro le correnti o le tempeste. I dispositivi galleggianti trasferiscono l'energia attraverso le braccia ad un dispositivo, che si trova nella struttura centrale durante la fase di discesa delle onde. A questo punto, il dispositivo trasmette gli impulsi ad un generatore, producendo così energia elettrica. L'energia viene poi trasferita a terra con un cavo marino. Con un'altezza media dell'onda di 1 metro e per un periodo di 9 onde al minuto (frequenza di 0,15 Hz), un singolo modulo può estrarre una potenza media effettiva (per 24 ore e 365 giorni all'anno) di circa 4 kW dei 7 kW nominali che sono stati installati. Questo giustificerebbe la produzione di circa 35.000 kWh di energia. Ovviamente, in certe aree del mare, dove l'onda media è più grande, è possibile ottenere una potenza maggiore. I moduli, propriamente posizionati ad una giusta distanza tra loro, per prevenire che collidano, possono essere moltiplicati, per formare diversi impianti di diverse dimensioni, a seconda dei bisogni del mercato. Il WEM è un sistema semplice che si può adattare a diversi tipi di mare, ed è capace di sfruttare i movimenti delle onde da tutte le direzioni. Questo gli permette di funzionare anche in casi di onde più piccole, come quelle di 20 centimetri. Il convertitore occupa uno spazio molto piccolo, circa 4kW per m<sup>2</sup> installato. Può essere installato nelle aree vicino alla costa o in mare aperto, e ha uno scarsissimo impatto ambientale. Il sistema offre ovvi vantaggi e un'opportunità di rendere autonome le isole e le località remote, grazie alla sua capacità di trasferire l'energia che produce, come per esempio lungo gli 8000 km dalla costa italiana. Un'applicazione del WEM riguarda le piattaforme offshore, perchè può essere una risorsa molto utile di fornitura di energia per le piattaforme in funzione, ma anche per quelle che non sono più operative. Cento moduli WEM, che possono essere facilmente connessi a una piattaforma, possono produrre abbastanza energia da prevenire la demolizione di una piattaforma. La sua modularità rende possibile di creare piccole installazioni di pochi kilowatt e sistemi di megawatt: su una striscia di mare poco più grande di un chilometro quadrato, potrebbe, per esempio, essere adatta per un impianto di più di 100 MW. Il successivo sviluppo del WEM, prevede la creazione di un piccolo impianto dimostrativo, composto di 18 moduli per un totale di circa 130 kW. Il sistema offre buone prospettive di redditività, anche per un piccolo impianto di 130 kW, e l'investimento può essere recuperato in un periodo di

tempo breve, dai 3-5 anni a seconda delle politiche fiscali e degli incentivi per le energie rinnovabili[46].



Figura 4.29. Progetto WEM nella laguna di Venezia. Fonte comunedivenezia.it

#### 4.2.4 Rewec 3

Distanza dalla costa	Onshore
Principio di funzionamento	Oscillating Water Column
Power Take-Off	Turbina ad aria

Un cassone REWEC3 è costituito da un condotto verticale (1) interagente con il moto ondoso incidente mediante un'imboccatura superiore (2). Tale condotto è, poi, collegato ad una camera di assorbimento (3) attraverso una luce di fondo (4). La camera di assorbimento è posta in contatto con l'atmosfera mediante un condotto (5), nel quale è alloggiata una turbina self-rectifying (6). Perciò, la camera di assorbimento contiene una massa d'acqua (3a) nella parte inferiore e una sacca d'aria (3b), nella parte superiore. A causa del moto ondoso davanti alla parete, si genera una fluttuazione di pressione sull'imboccatura superiore esterna del condotto verticale, che causa in fasi alterne l'entrata e l'uscita dell'acqua dall'impianto. La fluttuazione porta a comprimere (cresta d'onda) e a decomprimere (cavo d'onda) il polmone d'aria nella camera di assorbimento, ed

il flusso d'aria generato fa azionare la turbina/generatore posizionata nella parte superiore della camera, producendo energia elettrica[47].

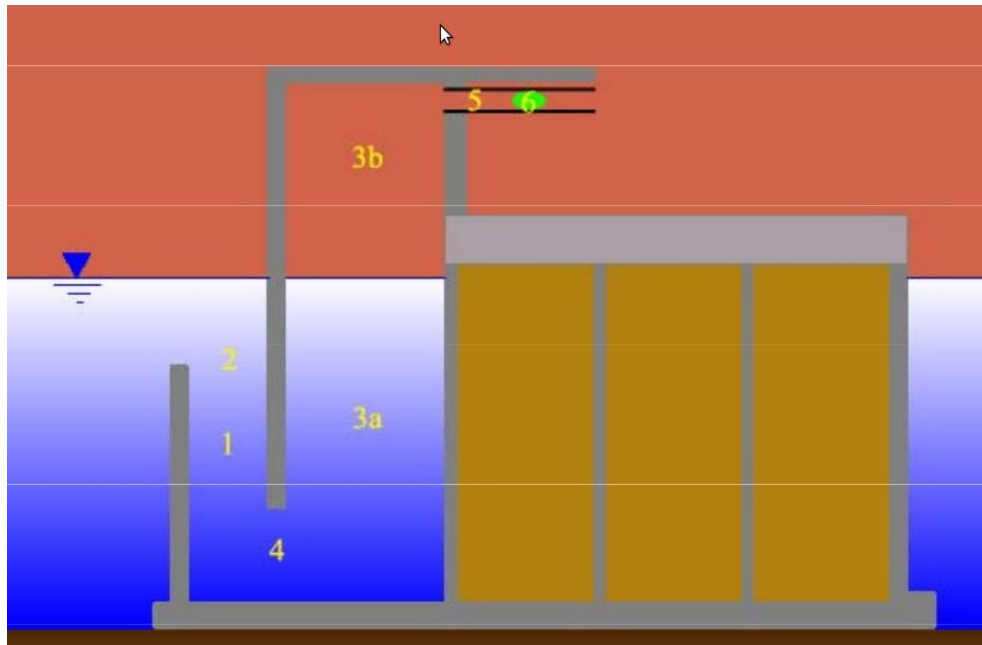


Figura 4.30 Schema di funzionamento del Rewec3. I numeri si riferiscono alla descrizione data sopra. Fonte waveenergy.it

Il dispositivo U-OWC (*Oscillating Water Column*), chiamato REWEC3 (*Resonant Wave Energy Converter, Realizzazione 3*), che è capace di ottenere facilmente una risonanza naturale, con onde casuali generate dal vento, permettendo di assorbire una grande quantità di energia ondosa, è stato concepito e brevettato in Italia. La caratteristica del dispositivo REWEC3 è tale da produrre un aumento delle prestazioni idrodinamiche del sistema, per quanto riguarda gli impianti OWC tradizionali. L'introduzione del dotto a U, tra la tasca d'aria e il mare aperto, è responsabile dei seguenti risultati principali:

- L'U-OWC è capace di assorbire una quantità di energia ondosa più grande di quella assorbita dagli OWC convenzionali in ogni caratteristica, negli stati del mare forti e in quelli più deboli e con onde generate dal vento e con mare lungo. Questo è dovuto, principalmente, alla seguente ragione: un U-OWC ha un periodo proprio più grande di quello di un OWC convenzionale, e vicino al periodo delle onde con la maggiore percentuale dell'energia ondosa, si noti che il periodo proprio degli OWC è più piccolo rispetto ai periodi delle onde oceaniche;
- L'elemento aggiuntivo nel nuovo cassone U-OWC, permette di regolare il periodo proprio dell'impianto durante il progetto. Perciò l'impianto può essere progettato, per avere un periodo proprio molto vicino al periodo di

picco delle pressioni dell'onda incidente, alla quale è associata la quantità maggiore di energia. Il periodo proprio dell'impianto è regolato con la progettazione in maniera adeguata alle loro parti attive. Questo permette il raggiungimento di forti amplificazioni delle prestazioni dell'impianto REWEC3 rispetto all'OWC.

- La resistenza strutturale di un OWC convenzionale è ridotta a causa della grande apertura sul lato colpito dal mare. L'U-OWC supera questo limite, essendo caratterizzato da un'alta resistenza strutturale garantita dai due muri verticali, quello del dotto verticale e quello della camera interna, parzialmente sovrapposti su ciascun lato sul lato verso il mare[48].



Figura 4.31. Sezione del progetto d'implementazione del convertitore Rewec3 nella barriera frangiflutti del porto di Civitavecchia

### 4.3 Desalinizzazione

I convertitori a moto ondoso possono essere anche utilizzati per la desalinizzazione, in maniera diretta o indiretta, estraendo energia dall'acqua del mare. Si pensa infatti che nel futuro si possa implementare anche la funzione di desalinizzazione. Direttamente il convertitore può comprimere l'acqua per poterla filtrare in un sistema ad osmosi inversa, oppure indirettamente il WEC può produrre energia elettrica per alimentare un impianto di desalinizzazione. La scarsità crescente di acqua fresca sta portando ad un crescente utilizzo della desalinizzazione su larga scala. Tuttavia, l'energia richiesta per avviare degli

impianti di desalinizzazione, rimane un fattore limitante. L'idea di utilizzare le risorse rinnovabili è quindi molto attraente, e sono stati fatti molti studi su questo tema, la maggior parte legati all'energia solare o eolica. Si consideri ora la potenzialità nel collegare l'energia delle onde oceaniche alla desalinizzazione.

#### **4.3.1 Desalinizzazione a moto ondoso**

Considerando le tecnologie per la desalinizzazione, alimentate con il moto ondoso, si conclude che il lavoro fatto in questo campo è relativamente poco. Lungo le coste aride e assolate, un impianto efficiente di desalinizzazione a moto ondoso potrebbe fornire acqua per irrigare una striscia di terra larga 0.8km se le onde sono alte 1m, e crescendo a 5km con onde alte 2m. Comunque, il moto ondoso è principalmente sfasato con il fabbisogno dovuto all'evapotraspirazione, il che porta a dei rapporti di capacità tra 3 e 9, che rappresentano i rapporti delle aree di terra che potrebbero essere irrigate con o senza un immagazzinamento stagionale. In assenza di immagazzinamento, un dispositivo progettato per un uso esteso, dovrebbe essere ottimizzato per le altezze delle onde estive di circa 1m. Se l'immagazzinamento è disponibile, dovrebbe essere ottimizzato per le altezze delle onde invernali di 2-2.5m. La maggior parte degli sforzi compiuti per la conversione del moto ondoso, si è focalizzata sulla produzione di energia elettrica. Ogni tipo di convertitore potrebbe, in principio, essere accoppiato con un impianto di desalinizzazione elettrico, sia esso con o senza la connessione alla rete elettrica. Esistono anche altri tipi di tecnologie, come verrà evidenziato in seguito, che saltano il passaggio intermedio di generazione di elettricità, e convertono direttamente l'energia ondosa in energia di pressione dell'acqua di mare che viene quindi direttamente desalinizzata in un impianto a osmosi inversa[49].

#### **4.3.2 Paesi con scarsità d'acqua**

In [50] vengono considerati i casi di diverse nazioni bagnate dall'oceano e che soffrono di scarsità d'acqua: Marocco, Oman, Somalia e Sud Africa. La desalinizzazione a moto ondoso ha la possibilità di fornire una parte importante del deficit nazionale, che corrisponde alla quantità richiesta per innalzare la disponibilità d'acqua dolce a 1700 m<sup>3</sup>/persona/anno. In Marocco, per esempio, la desalinizzazione a moto ondoso potrebbe fornire il 16% delle mancanze, aumentando al 64% nel caso dell'Oman. La Somalia è l'unica nazione continentale di quelle considerate dove la fornitura potenziale eccede chiaramente il deficit, di un fattore di circa 6. L'isola di Antigua e di Bermuda ha il potenziale di soddisfare il loro intero deficit d'acqua attraverso la desalinizzazione a moto ondoso. Lo stesso sembra essere vero per molte altre isole, quali le Canarie e le Maldive, dove la mancanza di pioggia va a coincidere



con una risorsa ondosa abbondante. Allo stesso modo, ci sono molte regioni aride bagnate dall'oceano che appartengono a stati che non figurano essere manchevoli d'acqua a livello delle statistiche nazionali. Questo include le regioni degli Stati Uniti, l'Australia Occidentale, il Cile e l'India per nominarne alcune. Comunque, la disponibilità stagionale delle risorse d'acqua è generalmente sfasata con il fabbisogno d'acqua per l'irrigazione. I rapporti di capacità, che relazionano il potenziale d'irrigazione con un adeguato immagazzinamento d'acqua con quello senza immagazzinamento, varia da 3 a 9. Tra 100 e 200 giorni di stoccaggio sono necessari per eliminare il bisogno di una capacità eccedente causata da uno sbagliato abbinamento stagionale. Mentre la desalinizzazione a moto ondoso tende a produrre acqua uniformemente lungo la costa, l'utilizzo non sarà in genere uniforme e avverrà sia nell'entroterra che sulla costa. Anche questo tenderà a diminuire la capacità utile della risorsa, a seconda di quanto facilmente l'acqua possa essere trasportata da dove viene prodotta a dove è necessaria[51].

#### **4.3.3 Costo di distribuzione**

Tra gli studi fatti sui costi del trasporto di grossi volumi d'acqua, si cita quello di Zhou e Tol in [52], in cui si conclude che il costo energetico della desalinizzazione dell'acqua è equivalente al trasporto orizzontale oltre le centinaia di chilometri. Questo significa che la redistribuzione di acqua desalinata lungo la costa potrebbe essere fattibile. Al contrario, il trasporto verticale dell'acqua richiede circa 1000 volte in più di energia del trasporto orizzontale, che potrebbe escludere l'utilizzo di acqua desalinata in molti posti nell'entroterra. Si noti che questa restrizione si applica egualmente a tutti i tipi di impianti di desalinizzazione, senza tener conto della risorsa di energia che li alimenta. Sempre in [53] si è dimostrato che potrebbero esserci dei vantaggi sostanziali nello sviluppare gli impianti di desalinizzazione a moto ondoso. Per spalmare i costi di sviluppo, sarebbe vantaggioso sviluppare dei dispositivi per l'utilizzo in un'ampia gamma di ubicazioni. Questo richiederà una specificazione delle tipiche condizioni operative. Nell'assenza di uno stoccaggio stagionale dell'acqua, i desalinatori a moto ondoso dovrebbero essere ottimizzati per l'estate quando l'altezza delle onde sono al minimo: circa 1m per la maggior parte delle posizioni studiate. Se l'immagazzinamento è disponibile, comunque, è meglio ottimizzare per le onde più grandi che si verificano in inverno, dato che contengono la maggior parte dell'energia. Queste hanno un'altezza nel range di 2-2.5 m. Ancora poca ricerca è stata svolta sulla desalinizzazione a moto ondoso, paragonata alla quantità di lavoro svolta sulla desalinizzazione alimentata da altri tipi di energia rinnovabile[54].

#### **4.3.4 Sistema Oyster**



In [55] viene analizzato un impianto di desalinizzazione a moto ondoso autonomo che consiste di un convertitore Oyster accoppiato direttamente ad un impianto di desalinizzazione a osmosi inversa con recupero di energia. L'Oyster è un convertitore a moto ondoso del tipo a battente oscillante che viene utilizzato in posizione nearshore in profondità dell'acqua di 12m. L'azione delle onde sul battente ne causano il movimento in avanti e indietro e questo movimento è contrastato da una pompa marina a doppia azione ad alta pressione; in questo modo estrae energia dalle onde. Una serie di valvole di ritegno rettificano il flusso dalla pompa a doppia azione per fornire un flusso unidirezionale. Il flusso viene poi regolato usando un accumulatore riempito di gas ad alta pressione, che riduce le variazioni conseguenti della pressione e del flusso, assieme ad una valvola di ritegno a pressione, che assicura che la pressione all'interno del sistema non diventi troppo grande. L'acqua pressurizzata viene alimentata direttamente nell'impianto di desalinizzazione, che consiste fondamentalmente di una serie di membrane ad osmosi inversa e di un e di scambiatori di pressione e intensificatori per il recupero dell'energia. L'acqua desalinata dalle membrane a osmosi inversa viene convogliata con una tubazione ad un recipiente a bassa pressione, mentre la salamoia viene alimentata nello scambiatore di pressione-intensificatore, prima di essere in ultimo riimmessa nel mare.

#### *Analisi tecno-economica*

Il costo minimo dell'acqua da un impianto a desalinizzazione a moto ondoso autonomo è stato stimato essere £0.45/m<sup>3</sup> (2009), che è all'incirca lo stesso costo dell'acqua di un impianto di desalinizzazione standard. Il costo simile dell'acqua si verifica finché il consumo specifico di energia dell'impianto di desalinizzazione a moto ondoso è inferiore di un impianto standard, perché non ha bisogno di convertire l'acqua pressurizzata in elettricità e di nuovo in acqua pressurizzata, i costi di investimento capitale sono più alti, perché la variabilità della fornitura di energia significa che l'impianto funziona con un capacity factor medio del carico di circa 62%, e una parte dell'energia ondosa catturata viene scartata a causa della dimensione limitata dell'impianto di desalinizzazione. Tuttavia, nonostante i costi dell'acqua possano essere simili, il potenziale degli impianti autonomi di desalinizzazione a moto ondoso è significativo a causa della maggior flessibilità rispetto a dove può essere impiegato. Oltretutto, l'impianto di desalinizzazione a moto ondoso ha diversi vantaggi ambientali nell'utilizzo della terra e smaltimento della salamoia. Certamente, il costo simile dell'acqua implica che la desalinizzazione a moto ondoso sia competitiva con tutti gli impianti di desalinizzazione, non solo quelli in posizioni remote dove gli impianti autonomi vengono generalmente impiegati, e perciò è una soluzione

economicamente competitiva per la desalinizzazione ovunque il clima ondosso sia sufficientemente energetico. L'utilizzo parziale del costoso impianto di desalinizzazione suggerisce che una soluzione ibrida, dove l'elettricità per la desalinizzazione potrebbe venire da più fonti (moto ondosso o elettricità) e/o dove il moto ondosso potrebbe alimentare più di un impianto (desalinizzazione o generazione di elettricità), potrebbe essere economicamente attrattivo. Tuttavia, le simulazioni iniziali di un impianto ibrido non sono state incoraggianti a causa della flessibilità limitata delle pompe e dei motori e a causa della necessità di sviluppo di algoritmi di controllo appropriati per definire i percorsi dei flussi di energia[56].

### *Barriere*

Diverse barriere tecnologiche esistono, che devono essere ovviate se il moto ondosso deve essere sfruttato come ci si figura. La prima di queste barriere è lo sviluppo della tecnologia di recupero dell'energia, che non è ancora disponibile nel formato descritto. La seconda barriera è lo sviluppo di un filtraggio adatto e di una tecnologia di pre-trattamento che può essere impiegata con il convertitore a moto ondosso e che possa operare senza assistenza o manutenzione particolare per lunghi periodi di tempo. In ultimo, il funzionamento accettabile delle membrane a osmosi inversa nelle condizioni di alimentazione variabili fornite dal convertitore a moto ondosso deve essere confermato, nonostante esista già l'evidenza che indichi che le condizioni di alimentazione variabile non dovrebbe causare problemi importanti. Nessuna di queste barriere sembra essere insuperabile, e nemmeno le soluzioni dovrebbero causare un aumento significativo dei costi dell'acqua. Perciò, la desalinizzazione dell'acqua sembra essere sia economicamente attrante sia tecnicamente fattibile, il che può essere confermato nel futuro prossimo con l'impiego di un prototipo[57].

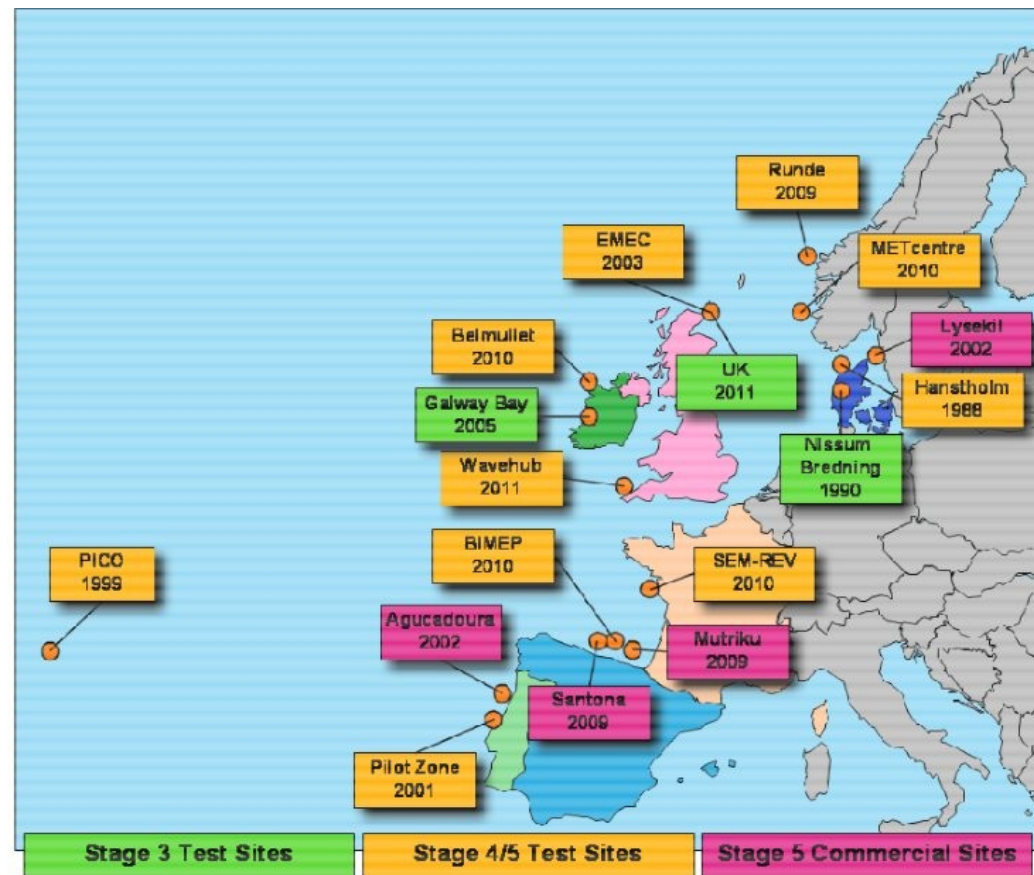
## Capitolo 5

### Programmi di ricerca in corso e wave farm in progetto

L'interesse nel campo dell'energia del moto ondoso ha prodotto negli ultimi anni una serie di iniziative concrete nell'ambito della ricerca e della sperimentazione. Sono stati costruiti, in Europa soprattutto e nel mondo, dei siti di prova per le tecnologie a moto ondoso. Molti sono in costruzione ed altri sono ancora alla fase progettuale. A livello commerciale invece, vere e proprie wave farm non sono ancora state commissionate. Sono tuttavia in progetto diverse wave farm multidispositivo che entreranno probabilmente in funzione entro il 2020. In questo capitolo si elencano i progetti più importanti e i più promettenti, con un occhio di riguardo per quello che sta avvenendo in Italia.

#### 5.1 Progetti di ricerca

Nel campo di ricerca sul moto ondoso ci sono molte idee ma, in questo momento, solo poche promettono di raggiungere la realtà commerciale. Oltre 40 dispositivi sono stati identificati durante lo European Coordination Action Project (Progetto di attività di coordinamento europeo) supportato dal Framework 6[1]. Una commercializzazione di successo dei dispositivi a moto ondoso, richiede un ampio collaudo a tutti i livelli di scala, dall'idea e dalla teoria, per poi passare al modello a scala ridotta, a grandezze intermedie e su scala oceanica. Sono richieste molte iterazioni di prova, e l'infrastruttura di prova è fondamentale per l'intero processo. Le infrastrutture che provvedono a tutti questi stadi di sviluppo esistono in tutta Europa, dalle vasche a scala ridotta a quelle più grandi su larga scala e a scala media, o dai siti costieri protetti fino ai siti di prova offshore. Comunque, l'onere di trovare la giusta infrastruttura per lo stadio di sviluppo del dispositivo, si è riversato sugli sviluppatori. La mancanza di consapevolezza, o la difficoltà nel trovare l'accesso a particolari siti di prova, in diversi paesi ha ostacolato il processo di sviluppo per particolari dispositivi. In questo capitolo vengono presentati i progetti di ricerca più significativi per l'energia ondosa, a partire da quelli individuati dal progetto europeo MARINET rappresentati nella fig.5.1.



*Figure (iii): Present & Future European Sea Trial Sites*

Figura 5.1 Siti europei di ricerca marina, presenti e futuri

### 5.1.2 Sviluppo di un progetto

Il progetto europeo MARINET, si è incaricato di standardizzare lo sviluppo in stadi di una nuova tecnologia a moto ondoso. Questo piano di sviluppo sistematico, è stato stabilito negli anni passati in congiunzione con i gruppi pionieristici di sviluppo dei dispositivi a moto ondoso. Basato sulle loro esperienze, esso comprende le pratiche migliori, e le procedure raccomandate per l'evoluzione efficiente dei convertitori di energia ondosa, dall'idea alla commercializzazione. Esso implica un approccio progressivo nello sviluppo di una nuova idea, o di una variazione di vecchie idee, per i convertitori a moto ondoso, che sembra essere il più promettente. Per implementare tutta la scienza, e l'ingegneria necessaria a concepire un convertitore a moto ondoso, da un'idea fino a un prodotto commerciabile, viene proposto un piano a 5 stadi, che può essere liberamente collegato al sistema a 9 TRL (Technology readiness level) come indicato. Gli stadi e i TRL corrispondenti sono i seguenti[2]:

#### *Stadio 1. Verifica dell'idea (TRL 1-3)*

Comprende la prova dell'idea sotto forma di un modello idealizzato in scala ridotta (circa 1:50) in un contesto di onde regolari e monocromatiche, seguita da stati del mare irregolari. Le prime prove, servono ad identificare e a descrivere i processi fisici, in relazione alle variabili di progetto, così che la geometria del dispositivo possa essere ottimizzata. Le ultime servono a stimare il potenziale di prestazione in condizioni reali di mare mosso. Può essere anche definita l'idoneità alla navigazione dello scafo e degli ormeggi.

#### *Stadio 2. Verifica del progetto (TRL 4)*

E' uno stadio che utilizza un modello più grande e più sofisticato (circa 1:10), e le prove coprono un numero più esteso di stati del mare, includendo condizioni realistiche di sopravvivenza. Durante questa fase l'ingegneria viene introdotta nella forma di un progetto preliminare, e viene stabilita una stima elementare dei costi dei componenti del sistema. La produzione di energia annuale viene calcolata sulla base dell'assorbimento di potenza, misurata in una serie di stati del mare, usando una serie di condizioni generiche delle onde.

#### *Stadio 3. Verifica del sistema (TRL 5-6)*

E' un programma, che include la prova di tutti i sottosistemi che incorpora un PTO completamente operativo, che permette la dimostrazione del processo di conversione dell'energia, dall'onda al cavo elettrico. Se il costo è accettabile, lo stadio 3 viene preso in maggior dettaglio, con lo scopo di testare il convertitore di energia ondosa completo, ad una certa grandezza da sotto prototipo, circa 1:4, che possa essere impiegato in modo sicuro, e che produca potenza. Il dispositivo è ancora abbastanza piccolo, per facilitare semplicemente la gestione, ma grande abbastanza per provare l'impiego, le tecniche di recupero e di manutenzione in mare. Si verifica il primo coinvolgimento con le licenze, i permessi, la certificazione e i requisiti ambientali. Inoltre, i team di progetto proveranno i problemi della catena di fabbricazione, di produzione e di fornitura, nonostante il dispositivo potrebbe non essere connesso alla rete. La produttività rimane un requisito barriera dello stadio chiave in questi test. Due fattori chiave, per avere successo durante le prove in mare in tutti gli stadi, sono di progettare il dispositivo, incorporando un galleggiamento di riserva, che impedisca l'affondamento totale, nel caso di un'apertura dello scafo. Assicurare la garanzia e la sicurezza degli ormeggi e delle ancore, anche se ciò richiede una ridondanza costruita in serie.

#### *Stadio 4. Verifica del dispositivo (TRL 7-8)*

E' una parte critica del processo, e copre la verifica di un impianto pilota con un unico macchinario in mare, su una scala che si avvicina alla grandezza naturale

(circa 1:1). Questo stadio è un programma di prova dei progetti già verificati, piuttosto che ancora in sperimentazione, con nuove opzioni. Le prove possono essere inizialmente condotte in un sito, con stato di mare moderato, prima di prove estese, in una posizione esposta nell'oceano. Questo è un requisito molto impegnativo comunque, dato che riguarda tutti i componenti di ogni sottosistema del processo di conversione. Il dispositivo nella sua interezza deve essere pronto collaudato allo scopo, prima che lo stadio sia concluso. Il dispositivo deve anche essere connesso alla rete, prima della fine delle sperimentazioni di prova. Sono implicate operazioni pesanti di ingegneria in mare per cui i requisiti di sicurezza diventano importanti, come accade per l'O&M dell'impianto in condizioni realistiche. Dato che solo un'unica unità è impiegata, l'impatto ambientale sarà minimo, ma deve essere ugualmente intrapresa la monitoraggio della presenza della macchina nel sito.

#### *Stadio 5. Verifica economica (TRL 9)*

Lo stadio finale implica una prova di dispositivi multipli, inizialmente in piccoli schieramenti (circa 3-5 macchinari), che possono essere aumentati in maniera appropriata. Con la conclusione dei precedenti esperimenti in mare, la tecnologia e l'ingegneria di un dispositivo, dovrebbe essere ben stabilita e provata. Il rischio tecnico dello stadio 5 dovrebbe quindi essere minimizzato. Tuttavia, la conseguenza di un fallimento sarebbe significativa, e i rischi finanziari sono meno certi, dato che è il potenziale economico dei dispositivi impiegati come un parco di generazione a moto ondoso che è oggetto di studio. Inizialmente le interazioni idrodinamiche dei dispositivi verranno studiate, insieme alla stabilità della fornitura di elettricità, possibile grazie all'elettronica di potenza. La disponibilità e gli scenari di servizio, saranno problemi importanti, quando più macchine verranno impiegate, a seconda dei requisiti di O&M onshore e offshore. Gli aspetti ambientali, sia fisici che biologici, possono ora essere studiati in dettaglio in aggiunta all'effetto socio-economico, che il parco a moto ondoso avrà nell'area locale.

#### **5.1.2 Pico**

Posizione	Portogallo
Anno avviamento	1999
Scopo del progetto	Ricerca e sviluppo sui sistemi OWC

La centrale a colonna d'acqua oscillante, Pico OWC fu costruita in qualità di impianto pilota europeo di energia ondosa, cofondata dalla Comunità Europea, per dimostrare la fattibilità tecnica dell'energia ondosa, in una rete elettrica di una piccola isola[3].

### Principio di funzionamento

Questo impianto consiste in una struttura cava in cemento rinforzato, camera pneumatica, sopra la superficie libera dell'acqua, che comunica col mare e le onde incidenti attraverso un'apertura sommersa nella sua parete frontale, e con l'atmosfera attraverso un dotto con una turbina ad aria. Le onde incidenti causano un'oscillazione verticale della colonna d'acqua nella camera, che a sua volta causa un flusso d'aria alternato da e verso l'atmosfera, che aziona la turbina e il generatore ad esso connesso. L'elettricità è trasmessa alla rete locale dell'EDA (società regionale) nel punto di connessione alla rete di Cachorro. Un fattore importante di rischio nel progettare questo tipo di impianti è le dimensioni della camera pneumatica, per fornire risonanza con lo stato del mare incidente. Per evitare condizioni di pressione elevata e di stallo, una valvola di sfogo può essere aperta da 0% fino al 100%, a seconda dello stato del mare incidente[4].

- |                     |                            |
|---------------------|----------------------------|
| 1 Onda incidente    | 5 Valvola d'isolamento     |
| 2 Colonna d'acqua   | 6 Valvola ad azione rapida |
| 3 Camera pneumatica | 7 Turbina Wells            |
| 4 Valvola di sfogo  | 8 Generatore asincrono     |

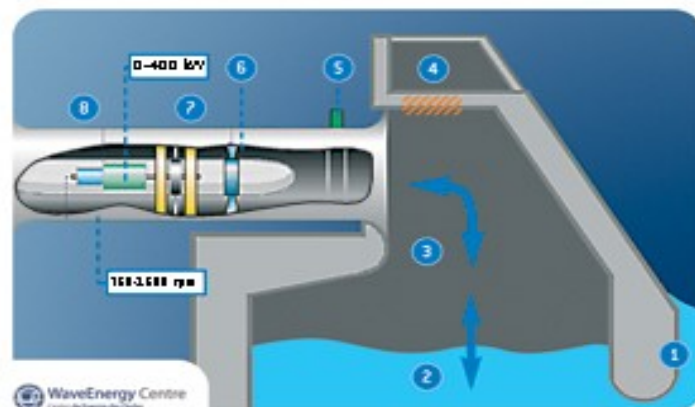


Figura 5.2. Schema delle componenti dell'impianto Pico. Fonte WaveEC

### Sviluppo della ricerca

Il progetto iniziò nel 1992 supportato dalle aziende di servizio EDP(nazionale) e EDA(regionale), e la sua costruzione fu conclusa nel 1999 in coordinazione

dell'IST (Instituto Superior Técnico). Tuttavia, diversi problemi tecnici, e la mancanza di finanziamento per affrontarli dopo la costruzione, causò l'interruzione del progetto per diversi anni. Poco dopo la sua creazione nel 2003, il Wave Energy Centre (WavEC) prese la responsabilità dell'impianto, recuperando la struttura originale, con il supporto finanziario del finanziamento nazionale e di alcuni dei suoi affiliati. Il primo test della Centrale Pico, fu nel 2005, e rivelò la persistenza di limiti tecnici seri della struttura originale del gruppo di turbo-generazione, che non era possibile risolvere interamente con il finanziamento disponibile. Tuttavia, la squadra coinvolta in questo progetto, ha insistito nella manutenzione e nei continui miglioramenti dell'impianto, fruttando l'aumento delle ore operative, della disponibilità e della produzione di potenza nel periodo 2006-2008. Nel 2008, gli sforzi si focalizzarono nell'esplorazione della possibilità di una maggiore revisione finanziata soprattutto da EDP. Tuttavia, dopo la prima fase del progetto, esso venne sospeso a causa di dubbi sulla longevità della struttura di cemento. Dal 2006, WavEC ha mantenuto la funzione dell'impianto principalmente con mezzi propri, molto limitati a causa della sfida tecnologica richiesta. Dei miglioramenti significativi sono stati raggiunti dal 2009, soprattutto miglioramenti delle vibrazioni della turbina-generatore, un problema meccanico che aveva impedito un miglior funzionamento dell'impianto. Nel 2010 vennero fatti dei miglioramenti, soprattutto con un circuito aggiuntivo di sicurezza, che fornisce una sicurezza sufficiente nell'operazione autonoma, senza un operatore in sito, dell'OWC. Durante il 2010, delle difficoltà tecniche minori ritardarono l'operatività completa dell'impianto, ma gradualmente, l'implementazione del controllo autonomo e remoto dell'impianto fu concluso, e venne installata una webcam nel sito. Dopo le prove di successo del funzionamento autonomo dell'impianto, da Settembre a Dicembre 2010, una produzione totale annua di 45 MWh venne raggiunta in 1450 ore di funzionamento. Durante il 2011, la priorità del progetto fu la preparazione della struttura dell'impianto, per ospitare una seconda piattaforma, per condurre prove sulle turbine. L'impianto è pronto per ospitare due condutture per le turbine di dimensione uguale, adatte per le prove di apparecchiatura tra i 100kW e i 700kW. Nel passato, solo uno di questi dotti veniva utilizzato, equivalente a metà dello spazio disponibile nell'impianto. Tuttavia, questa ed altre attività future, dipenderanno dalla possibilità di raccogliere fondi, per le riparazioni necessarie della struttura in cemento. Le stime rivelano la necessità, di un investimento tra € 1.5M e € 2M, per trasformare l'impianto Pico OWC, in un'infrastruttura di collaudo e di diffusione di interesse internazionale[5].





Figura 5.3. Vista posteriore della PICO OWC

Dal 2004, l'impianto è gestito da WavEC, un'organizzazione privata no-profit il cui introito deriva dall'Unione Europea (60%) e da progetti di ricerca e sviluppo nazionali (10%), servizi prestati alle compagnie (25%) e pagamenti dei suoi associati (5%). Inoltre è l'unica infrastruttura aperta ai test, alla ricerca, allo sviluppo, all'innovazione e alla dimostrazione. A causa della corrosione progressiva della struttura cementizia, per la forza dell'acqua marina, l'impianto sta affrontando un serio rischio di collasso. L'impianto Pico ha bisogno di un intervento urgente per riparare e rinforzare le sue mura, e proteggere le sue fondamenta contro l'erosione del fondale marino e l'abrasione. L'investimento richiesto si aggira a 1,5 milioni di euro, di cui 265.000 euro di fondi privati, per recuperare la parte sommersa della struttura[6].

### 5.1.3 Lysekil Project

Posizione	Svezia
Anno avviamento	2002
Scopo del progetto	Ricerca e sviluppo su convertitore Point Absorber

Lo scopo del progetto Lysekil, è di testare un nuovo concetto per generare elettricità dal moto ondoso del mare, in circostanze realistiche e per un lungo periodo di tempo. L'area di ricerca è situata sulla costa occidentale della Svezia, circa un miglio nautico (2km) a ovest della penisola di Islandsberg, nella municipalità di Lysekil. Il concetto si basa su un sistema di generatori mossi da un unico pistone[7].

#### *Principio di funzionamento*

Un generatore lineare rimane protetto sul fondale marino, ed è mosso, con una corda, da un galleggiante sulla superficie. Diversi generatori possono essere combinati in gruppi, circa 20-100m sotto il livello del mare, e possono ulteriormente essere combinati in gruppi, usando dei cavi standard sul fondale marino. Con l'aiuto dell'elettronica di potenza, la potenza alternata generata, viene convertita in corrente continua, che viene poi portata a terra attraverso dei cavi standard, e viene poi trasmessa alla rete di potenza con un trasformatore DC/AC. Questo sistema con galleggiante, corda e generatore sarà economico, robusto, ambientalmente innocuo e capace di far fronte alle condizioni estreme del mare. Oltre alla verifica tecnica e funzionale e allo sviluppo, il sistema sarà anche valutato scientificamente da molti punti di vista: ambientale, biologico marino ed ecologico marino. L'autorità locale in Västra Götaland ha dato il permesso di dispiegare fino a 40 galleggianti e un massimo di 10 dispositivi di potenza nel sito. La struttura di ricerca è programmata per essere completata per il 2009/2010 e sarà in operazione fino al 2013/2014 quando tutta l'attrezzatura sarà rimossa, oppure deve essere fatta richiesta per il prolungamento dei permessi[8].

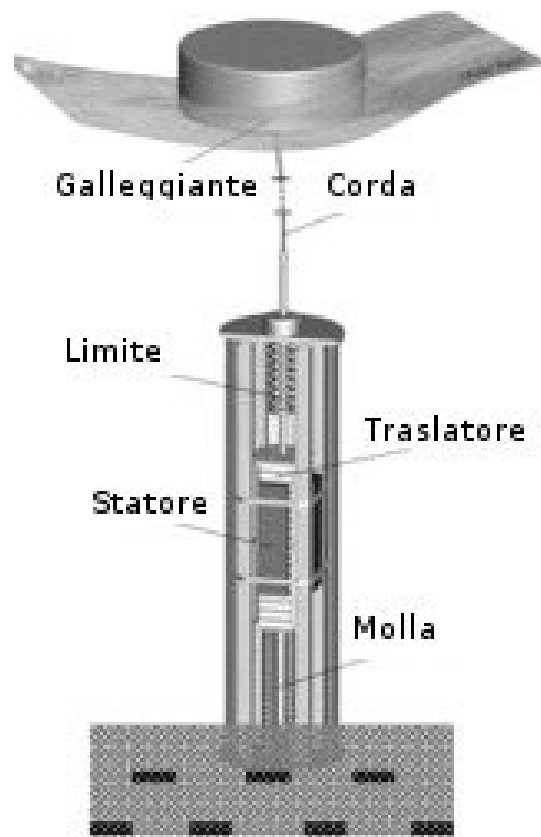


Figura 5.4 Componenti del convertitore a Point Absorber del Lysekil Project



Figura 5.5. Installazione dei dispositivi a Lysekil

### *Wave farm*

I ricercatori e gli studenti dottorandi dell'università di Uppsala hanno installato nel 2013, il primo generatore lungo 6.7m, in quello che diventerà una centrale elettrica a moto ondoso a Lysekil in Svezia. “Attraverso lo sviluppo del grande generatore, ad oggi abbiamo intrapreso il primo passo importante, rendendo la centrale a moto ondoso una realtà”, dice il Proessore Mats Leijon. “Il generatore sarà il primo al mondo a non usare i magneti permanenti”. I materiali di cui son composti sono rari e sono diventati dieci volte più costosi negli ultimi anni, ed hanno oltretutto un impatto negativo sull'ambiente. Abbiamo bisogno di alternative perciò stiamo utilizzando qualcosa di nuovo, i cosiddetti magneti in ferrite, in questo generatore”. Il progetto iniziò nel 2002 all'Università di Uppsala. L'obiettivo era di sviluppare un'idea per la potenza ondosa, basato su generatori posizionati sul fondale marino, e di testarlo in condizioni realistiche per un lungo periodo di tempo[9].

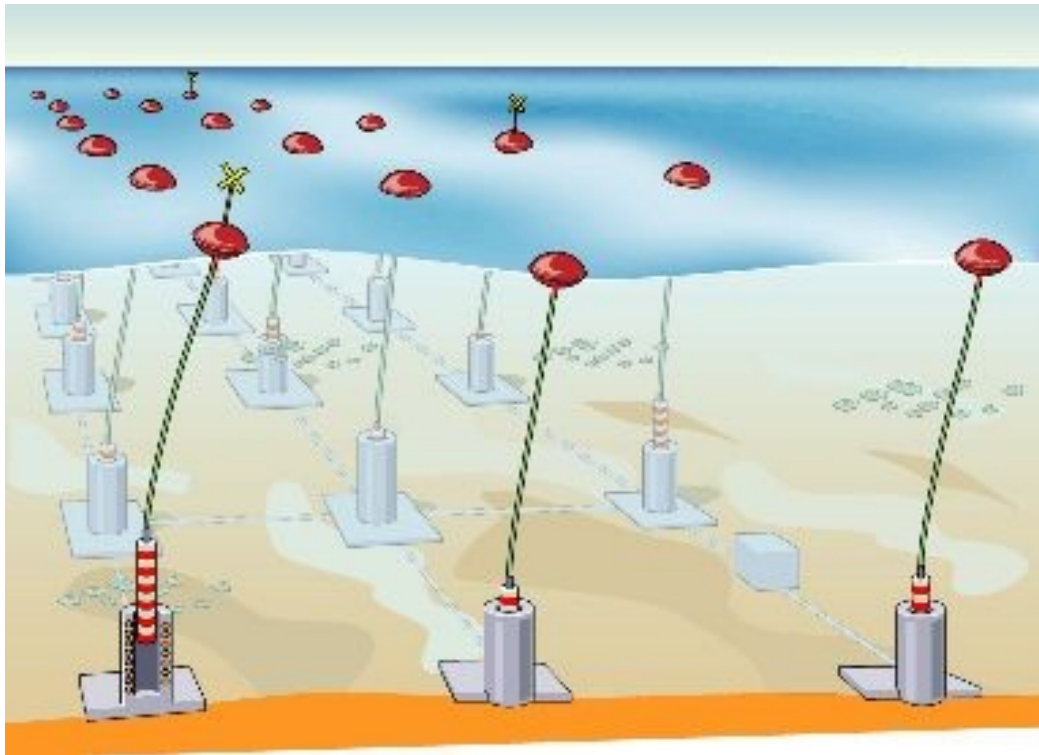


Figura 5.6. Grafica della centrale elettrica a moto ondoso Lysekil in progetto.

#### 5.1.4 European Marine Energy Centre

Posizione	Isole Orcadi, Scozia, Regno Unito
Anno avviamento	2003
Scopo del progetto	Sito di prova oceanico per sviluppatori di WEC

Il sito di prova ondosa EMEC fu costruito nel 2003, ed è ubicato in un posto ideale sulla punta ovest delle Orkney, a Billia Croo, fuori da Stromness, nel Regno Unito. Soggetto alle forze potenti dell'Oceano Atlantico del nord, è un'area con uno dei potenziali energetici ondosi più alti d'Europa, con un'altezza media dell'onda di 2-3m, ma si raggiungono valori estremi fino a 17m (record registrato da EMEC fino ad ora). Il sito consiste di 5 ormeggi cablati di prova, in un'acqua profonda 70m (quattro a 50m, uno più profondo), situato approssimativamente 2km al largo della costa e distaccato di 0,5km. In aggiunta a ciò, un ormeggio vicino alla costa, è posizionato più vicino alla sottostazione per progetti in acque basse. I 5 cavi sottomarini da 11 kV alimentano la stazione sottomarina EMEC, la quale ospita l'ingranaggio di cambio principale, il generatore di riserva e la camera di comunicazione, ed è stato attentamente

progettato per minimizzare l'impatto visivo. Questi cavi trasportano l'elettricità generata dai convertitori a moto ondoso in prova nel sito direttamente nella rete elettrica nazionale. Due galleggianti sono ubicati nel sito per misurare l'altezza dell'onda, il periodo e la direzione, e una stazione meteorologica costruita per lo scopo fornisce i dati in tempo reale[10].



Figura 5.7. Vista aerea del centro EMEC per il moto ondoso alle isole Orkney. Fonte EMEC

Le tecnologie in prova al momento della stesura della tesi sono: l'Oyster, il Pelamis, il Seatricity e il Penguin, di cui si è parlato nel capitolo 4.

### 5.1.5 DanWEC Hanstholm

Posizione	Danimarca
Anno avviamento	2009
Scopo del progetto	Sito di prova nel Mare del Nord per sviluppatori di WEC

Danish Wave Energy Centre, DanWEC (centro danese per il moto ondoso), situato a Roshage ad Hanstholm, è un centro di ricerca e base di prova per lo sviluppo della tecnologia a moto ondoso. Il mare del nord, al largo della costa di Hanstholm, presenta condizioni ondose giuste per il collaudo di macchine precommerciali per il moto ondoso. La stazione di prova è stata realizzata con la cooperazione tra diversi azionisti: sviluppatori per il moto ondoso, l'Università di Aalborg, il comune di Thisted, il porto di Hanstholm, Thy Business Forum, la Regione della Danimarca Nord e il Green Labs DK. Il DanWEC, completamente sviluppato, offrirà una varietà di servizi quali un'area di test

galleggianti, ancoraggio, cavo a riva, misurazioni di onde ed acquisizione di dati. Il centro comprenderà delle strutture per gli uffici, e impiegati che potranno assistere nei problemi, quali le richieste di permessi, e le connessioni temporanee alla rete elettrica. Il progetto è di installare una mini piattaforma 3 km a largo, a circa 25 metri di profondità. La piattaforma avrà la forma a pila, uguale a quelle usate per le fondamenta delle turbine eoliche. Le macchine di prova per il moto ondoso, saranno attaccate alla piattaforma con cavi sottomarini individuali, con una connessione via cavo a terra capace di trasmettere fino a 3MW. In prova ora al DanWEC ci sono due importanti tecnologie, il WaveStar e il Dexa Wave[11].

#### *Moto ondoso in Danimarca*

E' un obiettivo, dichiarato del governo danese, di ottenere una produzione di energia libera dai combustibili fossili in Danimarca, entro un futuro prevedibile. Il governo ha destinato per lo sviluppo del moto ondoso 25 milioni di corone danesi. Alcuni dei migliori progetti per il moto ondoso al mondo si trovano in Danimarca, e l'economia danese in questo campo è all'avanguardia. La cooperazione per il moto ondoso, fondata dall'associazione economica per il moto ondoso, ha riportato la seguente visione per lo sviluppo in Danimarca: "Dall'anno 2030 lo sviluppo della tecnologia del moto ondoso, deve consentire una fornitura sostenibile ed economica di fornitura elettrica, da parchi energetici offshore in Danimarca". Si stima, che la quantità di energia ondosa, che passa ogni anno attraverso la parte danese del Mare del Nord, ammonti a 30 TWh. Se una serie di strutture per il moto ondoso venisse installata su un tratto di costa lungo 150km e 100 chilometri al largo della costa occidentale dello Jutland, questa produrrebbe circa 5 TWh all'anno, che equivale a circa il 15% del consumo danese di energia. Da un punto di vista danese, questo rende lo sviluppo della potenza ondosa più importante come opportunità di esporto, considerando che il potenziale energetico ondoso è considerevolmente più alto in altre parti del mondo, come per esempio lungo la costa atlantica europea, dove il potenziale è più del doppio rispetto alle acque danesi. L'industria per il moto ondoso è potenzialmente un mercato di grande esportazione e di impiego, con la Danimarca che ha già un ruolo dominante nello sviluppo della tecnologia e del know-how[12].

#### **5.1.6 Wave Hub**

Posizione	Regno Unito
Anno avviamento	2011
Scopo del progetto	Sito di prova oceanico per sviluppatori



di WEC

Wave Hub è un sito posizionato a 16km dalla costa settentrionale di Cornwall, nord est di St.Ives, a sud ovest dell'Inghilterra. Wave Hub è una struttura offshore connessa alla rete elettrica, a sud ovest dell'Inghilterra, per le prove su larga scala di tecnologie, che generano elettricità dalla potenza delle onde. Possiede una locazione di 25 anni di 8 km<sup>2</sup> di fondale marino, diviso in quattro ormeggi separati, disponibili alla locazione per gli sviluppatori di dispositivi a moto ondoso, connesso alla rete con un cavo sottomarino di 11/33 kV. L'hub stesso è posizionato sul fondale marino a 55 metri di profondità[13].

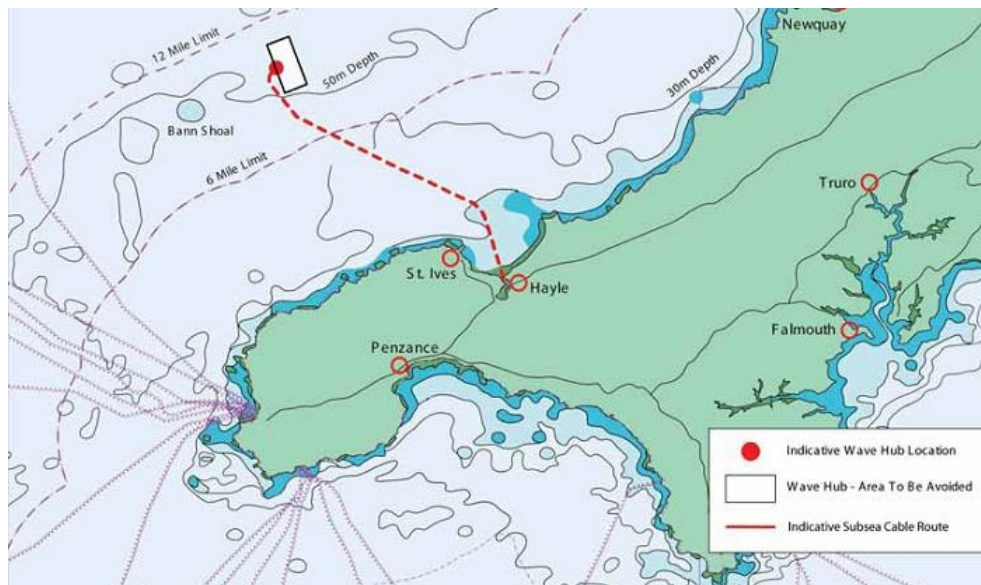


Figura 5.8. Mappa geografica del sito Wave Hub

La connessione alla rete avviene attraverso la sottostazione della Western Power Distribution ad Hayle. Il sistema Wave Hub opererà inizialmente a 11kV ed è capace di fornire 16-20MW di potenza. Una volta che l'industria avrà sviluppato le componenti sottomarine, per il funzionamento a 33kV, il sistema potrà essere fatto funzionare a 33kV, permettendo a Wave Hub di ospitare fino a 50MW di dispositivi[14]. L'Hub, da 12 tonnellate, è collegato alla rete elettrica inglese con un cavo sottomarino di 25 km e 1300 tonnellate, che opera a 11kV. Wave Hub ha i consensi necessari e i permessi per la generazione di energia ondosa fino a 20MW e offre un sito definito e completamente monitorato per la produzione di energia marina. Quattro ormeggi separati sono disponibili per l'affitto, ognuno con una capacità di 4-5 MW. Wave Hub può facilmente essere ampliato fino a 50MW di capacità generativa[15].



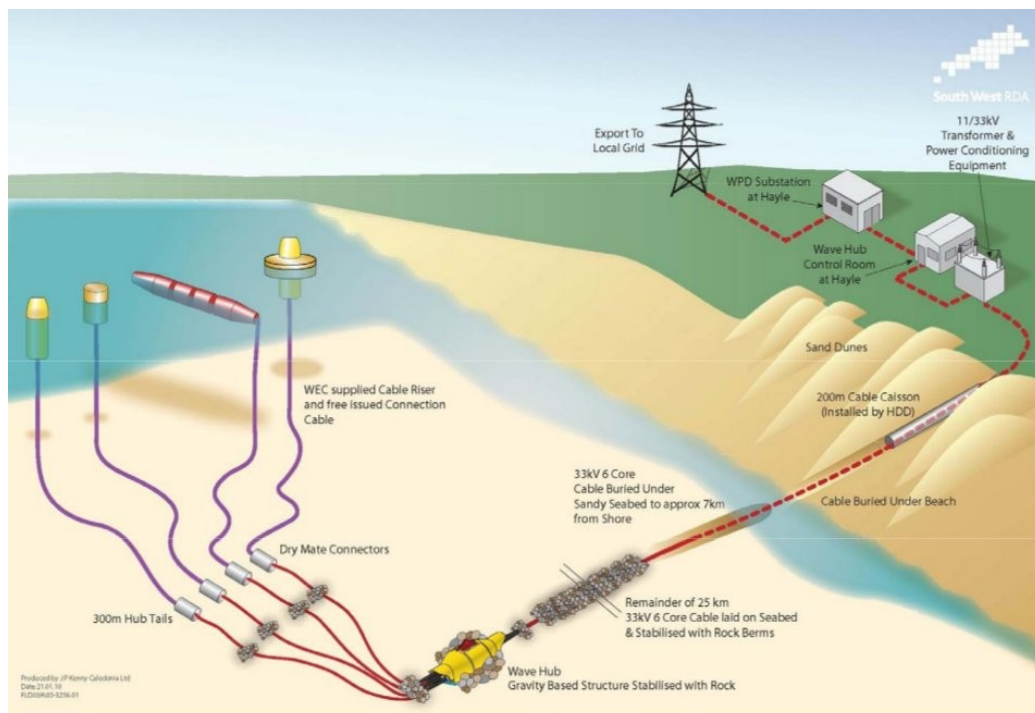


Figura 5.9. Grafica d'insieme del Wave Hub

### 5.1.7 Yongsoo

Posizione	Corea del Sud
Anno avviamento	2012
Scopo del progetto	Ricerca e sviluppo su un impianto OWC

L'obiettivo di questo progetto è di sviluppare il design, l'installazione, e le tecnologie operanti per un convertitore a moto ondoso (WEC) basato sul principio della colonna d'acqua oscillante (OWC). Lo scopo del progetto include il test in mare di un'impianto pilota, di modello standard, da 500 kW. L'impianto pilota sarà installato nell'oceano al largo di Yongsoo, Hankyung, nella provincia di Jeju nel 2012, e sarà valutato in condizioni operative fino alla fine del 2013. Il modulo di conversione del moto ondoso consiste di condotti, turbine ad azione, regolatori di potenza e di operatività, un generatore a induzione a doppia alimentazione, un generatore sincrono, un sistema di monitoraggio operativo, e una camera pneumatica che converte energia ondosa in energia cinetica. La turbina ad azione ed il generatore sono combinati in un'unità, per prevenire perdite energetiche causate dalla vibrazione assiale. Una delle due turbine ad

azione è equipaggiata con un anello circolare sui bordi delle palette per minimizzare la riduzione di efficienza causata dai vortici sulle estremità.

Le conquiste primarie e i progetti futuri sono i seguenti:

- Creazione di una mappa di densità energetica ondosa per le acque costiere coreane e la valutazione di siti ottimali per la generazione di potenza ondosa;
- Sviluppo e collaudo in mare di un WEC a boa condotto piegato all'indietro per i fari galleggianti;
- Sviluppo di un modello standard da 500kW OWC WEC con una struttura a cassa;
- Manifattura, installazione, operazione e commercializzazione di un impianto pilota nel 2012-2013 del tipo OWSC WEC[16].

### 5.1.8 Bimep

Posizione	Spagna
Anno avviamento	In ultimazione, avviamento previsto nel 2013
Scopo del progetto	Sito di prova oceanico per sviluppatori di WEC

Bimep è la prima struttura del suo genere in Spagna, di prova e connessa alla rete elettrica. Si creerà un intero settore industriale, attorno al moto ondoso nei Paesi Baschi, che rinforzerà l'attività tradizionale industriale. Situato al largo della costa basca, ad Armintza, 20 km da Bilbao, è un'area di 4x2 km in mare alla profondità compresa tra i 50 e i 90 m, dove quattro cavi sottomarini da 5MW collegano una sottostazione sulla costa con i quattro connettori. Il progetto, concepito per una facile connessione e disconnessione, renderà possibile, per diversi dispositivi, di connettersi e portar avanti i loro esperimenti[17]. Questo centro di prova, con 20MW di capacità di generazione, sarà un'installazione di riferimento a livello mondiale nel settore dell'energia delle onde, e faciliterà lo sviluppo di un settore industriale e di conoscenza in questo campo nei Paesi Baschi. La messa in funzione è prevista per la seconda metà del 2012[18]. Bimep si trova situato nella costa di Bizkaia, tra le località di Armintza-Lemoiz (Bizkaia), in una delle zone con più potenziale energetico della costa basca (21 kW/m), collegata molto bene e senza nessun interferenza con le spiagge vicine, né ad aree con nessun tipo di protezione ambientale. La zona di mare occupa una superficie totale di 5,3 km<sup>2</sup>, situandosi nel punto più vicino alla costa, a una distanza di 1700m. Esiste inoltre, un'area di mare vicina, che permetterà un futuro ampliamento dell'infrastruttura[19]. Bimep dispone di strutture aperte, che permettono agli sviluppatori dei convertitori a moto ondoso, di far installare le proprie macchine. Adatto per lo sfruttamento e la

dimostrazione di generazione di energia elettrica, ma anche per i test. Le condizioni del mar Cantabrico, creano delle condizioni eccezionali per provare l'efficacia delle nuove tecnologie, per l'approvvigionamento energetico dalle onde, che stanno sviluppando le imprese in tutta Europa. Bimep dispone di una moderna struttura sottomarina, di connessione alla rete elettrica a terra, e di un sistema di telecomunicazione, per raccogliere e analizzare sistematicamente i dati delle prove in mare[20].

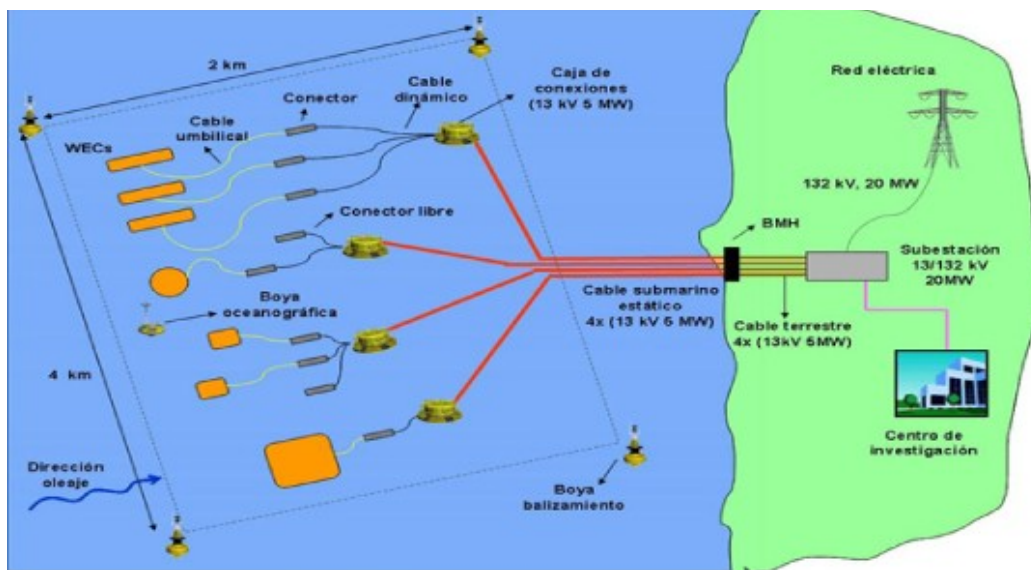


Figura 5.10. Grafica del sito di Bimep

### 5.1.9 Oosterschelde Tidal Project

Posizione	Paesi bassi
Anno avviamento	In costruzione, avviamento previsto nel 2013
Scopo del progetto	Impianto per lo sfruttamento delle correnti di marea e del moto ondoso

Il progetto del prototipo Wave Rotor della C-energy ha dimostrato che la tecnologia del Wave Rotor funziona. Il prossimo passo è dimostrare la prestazione a grandezza naturale e la durabilità a lungo termine. La OceanMill e i partner del consorzio, hanno iniziato col progetto di installazione di una struttura da 1.5MW di potenza di energia mareomotrice, in una delle aperture della barriera alle onde di Oosterschelde nei Paesi Bassi ( "Roompot 10"). Il processo, per il permesso e per la licenza, è stato completato, e la fase del progetto ingegneristico è iniziata. La data d'installazione pianificata è per la fine

del terzo trimestre del 2012. Il progetto funzionerà per 15 anni, e produrrà elettricità sufficiente per alimentare più di 1000 abitazioni con potenza mareomotrice pulita. La posizione ha caratteristiche uniche per una dimostrazione su scala commerciale, con condizioni offshore da mare aperto in una disposizione controllata, poiché la barriera si chiude solamente in condizioni ondose estreme[21]:

- Correnti giornaliere fino a 5,5 m/s o 11 nodi;
- Sito ad accesso diretto con disponibilità di accesso alla rete elettrica;
- Prova a lungo termine possibile.

I dati tecnici del progetto sono:

- Capacità installata: 1,500 kWp;
- 3x Wave Rotor: 3 x 500 kWp;
- Power Take Off (PTO): Scatola di cambio e generatore;
- Connessione alla rete: Disponibile direttamente a terra da Delta;
- Vita operativa: 15 anni;
- Progetto di vita: 20 anni;
- Correnti di marea: fino a 5,5 m/s;
- Velocità stimata: 4.0 m/s;
- Velocità di spegnimento: 5,5 m/s;

#### 5.1.10 Belmullet

Posizione	Irlanda
Anno avviamento	In costruzione, avviamento previsto nel 2014
Scopo del progetto	Sito di prova oceanico per sviluppatori di WEC

Il governo irlandese ha scelto la Sustainable Energy Authority of Ireland (SEAI), per giocare un ruolo principale nello sviluppo del settore dell'energia oceanica in Irlanda. L' Ocean Energy Development Unit (OEDU), fu fondato da SEAI nel 2008, con l'obiettivo di rendere l'Irlanda un leader mondiale nella fornitura di tecnologie per l'energia oceanica, e nel generare elettricità dalle onde e maree, al largo della linea costiera irlandese. Si spera che entro l'anno 2020, più di 1900 nuovi posti di lavoro verranno creati, e che ci saranno almeno 500 MW di capacità di generazione installata. Questa quantità alimenterà circa 50000 case. Per raggiungere questi obiettivi ambiziosi l' OEDU dovrà[22]:

- fornire supporto finanziario per le compagnie che sviluppano dispositivi per l'energia oceanica;

- sviluppare siti di prova per il moto ondoso e dimostrare questi dispositivi prima che diventino fattibili commercialmente, compreso il sito di prova nazionale per l'energia ondosa a grandezza naturale a Belmullet.

Tabella 5.1 Cronologia di sviluppo del progetto Belmullet[23]

Autunno 2011	Completamento degli studi sull'impatto ambientale, presentazione delle richieste per l'affitto della battigia e il permesso di pianificazione.
2012	Decisione di garantire l'affitto della battigia e il permesso di pianificazione
2013/2014	Installazione dei cavi sottomarini e completamento della costruzione della stazione secondaria
2014	Sito di prova pronto per i primi convertitori a moto ondoso a grandezza naturale

I convertitori di energia ondosa in prova nel sito, saranno connessi ai cavi elettrici, che saranno sotterrati a circa un metro sotto il fondale marino, e scorreranno fino alla sottostazione sulla terra, vicino alla spiaggia di Belderra, a Cross, sulla penisola Mullet, adiacente alla città di Belmullet. La quantità massima di elettricità prodotta, è legata alla fine alla dimensione della connessione permessa dalla Commissione per la Regolazione dell'Energia, e dalla capacità dei cavi elettrici. E' stata fatta richiesta per una connessione da 10 MW, con la capacità del cavo progettata per 10kV. La generazione di potenza dei convertitori a moto ondoso sarà dell'ordine di grandezza delle tipologie di turbine eoliche, che si vedono spesso nei parchi eolici sulla terraferma in Irlanda.

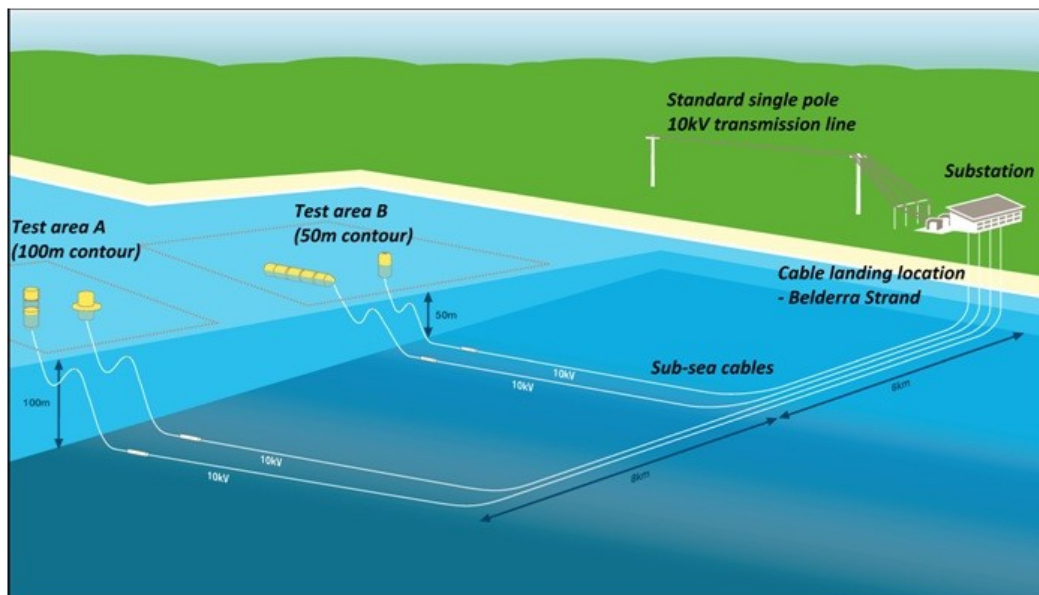


Figura 5.11. Grafica del sito di Belmullet

### 5.1.11 Santoña wave farm

Posizione	Spagna
Anno avviamento	In progetto, fase di sviluppo della tecnologia
Scopo del progetto	Ricerca e sviluppo del WEC PowerBuoy in vista della costruzione di una wave farm

Nel 2006 OPT formò una joint venture con Iberdrola S.A., la major globale del petrolio TOTAL, il governo spagnolo IDAE (istituto di risparmio energetico e di efficienza), e l'agenzia locale di sviluppo regionale SODERCAN, per lo sviluppo del moto ondoso al largo delle coste spagnole. La joint venture, chiamata Iberdrola Energias Marinas de Cantabria, fu formata con lo scopo di costruire una centrale elettrica a moto ondoso, connessa alla rete sulla costa settentrionale della Spagna. La prima fase del progetto include lo sviluppo del PowerBuoy[24].

#### *Waveport Project*

Il progetto Waveport mira a dimostrare un generatore di potenza di picco pari a 200 kW, su larga scala, connesso alla rete. Un convertitore di tipo punto assorbitore, il PowerBuoy, per il quale un prototipo su piccola scala è stato

testato. Waveport accelererà lo sviluppo di dispositivi alternativi installando una stazione ausiliaria a capsula sottomarina di 1,5 MW, una piattaforma aperta a 10 porte, per prova sui convertitori futuri. Gli obiettivi del sito sono[25]:

- Facilitare un approccio a piattaforma aperta per le utenze e gli sviluppatori di WEC attraverso l'utilizzo di una stazione ausiliaria sottomarina a capsula, riducendo ulteriormente i rischi associati con l'investimento in questa tecnologia. Ridurre il costo dell'elettricità generata dal moto ondoso fino a 4.3 c€/kWh entro il 2020;
- Miglioramento dell'efficienza energetica dei dispositivi a moto ondoso di almeno il 35% (fattore di carico fino ad almeno 75%) per mezzo dell'utilizzo del sistema di messa a punto “onda per onda” (wave by wave)
- Ridurre il costo capitale dell'infrastruttura del dispositivo WEC a meno di €2000/kW;
- Accelerare lo sviluppo di una centrale a moto ondoso nel sito di Santona in Spagna, a 90MW entro il 2020 generando oltre 500GWh all'anno compensando circa 215,000 tonnellate di CO<sub>2</sub> all'anno;
- Accelerare lo sviluppo delle centrali europee a moto ondoso fino a 0.97GW generando oltre 6 TWh compensando circa 2.6 mT di CO<sub>2</sub> all'anno.

Tabella 5.2. Dati del progetto Waveport[26]

Data d'inizio	2010-02-01
Data di fine:	2014-01-31
Durata	48 mesi
Costo progetto	8.503.014 euro
Finanziamento progetto	4.591.850 euro
Acronimo programma	FP7-Energy
Tipo di programma	Settimo programma quadro

### 5.1.12 FlanSea Project

Posizione	Belgio, Mare del Nord
Anno avviamento	2013, fase di sviluppo del WEC
Scopo del progetto	Impianto offshore eolico misto moto ondoso

FlanSea è una collaborazione unica, costituita col supporto dell'agenzia fiamminga per l'innovazione della scienza e tecnologia IWT, dall'università di Ghent, l'autorità portuale di Ostend e un numero di compagnie fiamminghe.



Assieme stanno sviluppando il WAVE PIONEER, un convertitore di energia ondosa. Il WAVE PIONEER è un dispositivo galleggiante che genera energia dai flutti delle onde. Fu progettato specificatamente per un clima ondoso moderato, come quello della costa belga. Il 23 Aprile 2013, il convertitore a moto ondoso di FlanSea, Wave Pioneer verrà varato al molo di Zeewezen nel porto di Ostend. Dopo poche settimane il dispositivo di prova verrà spostato e installato a circa un chilometro dalla costa di Ostend. Il WAVE PIONEER verrà largamente testato fino alla fine del 2013 in vista di un ulteriore sviluppo. In condizioni tempestose, il sito di prova si comporterà come un bacino ondoso rappresentativo di un sito offshore con condizioni di onde più estreme. In questo contesto, il potenziale di sopravvivenza del convertitore a moto ondoso è tanto importante quanto la sua efficienza. Il convertitore non sarà connesso alla rete elettrica di distribuzione in questa fase. Queste aree del mare, sono anche campi di prova per le tempeste violente più importanti. Queste onde di tempesta trasportano grandi pressioni da sopportare sui convertitori a moto ondoso, trasmettendo grandi sforzi sulla struttura e sul sistema di ancoraggio[27].

#### *Stato del progetto*

Il 27 Giugno 2012, Mr Wathelet, il segretario di stato per l'ambiente, l'energia, la mobilità e le riforme istituzionali del Belgio, ha garantito una concessione a THV Mermaid, per la costruzione del settimo ed ultimo parco eolico nel Mare del Nord, nella regione fornita dal Decreto Regio del 12 Dicembre 2000 e 3 Febbraio 2011, per lo sviluppo delle installazioni per la produzione di elettricità dall'acqua, dalle correnti o dal vento. Turbine eoliche potenti, ognuna con una capacità di 6 o 7 MW, renderà possibile raggiungere la produzione più grande possibile di energia sulla superficie disponibile, circa 450 MW. In aggiunta, dei convertitori a moto ondoso (WavePioneer) verranno installati tra le turbine eoliche: queste boe ad alta tecnologia, che generano energia dalle onde, forniranno una capacità aggiunta di 20 MW. Questo parco energetico verrà costruito nell'area a nord di Bligh Bank. Quest'area, con una superficie di più di 28 km<sup>2</sup> posizionata circa a 50km dalla costa, è il punto più a nord della regione, fornita per la costruzione dal Decreto Regio per i parchi a energia rinnovabile. Una volta completamente in funzione, il parco eolico produrrà elettricità equivalente al consumo annuale di 500,000 famiglie, e come risultato, 451,000 tonnellate in meno di CO<sup>2</sup> verranno emesse. In funzione dell'aggiudicazione dei permessi necessari, e della struttura regolatoria, le prime turbine eoliche saranno operative nel 2016, e l'intero parco entro la fine del 2017[28].

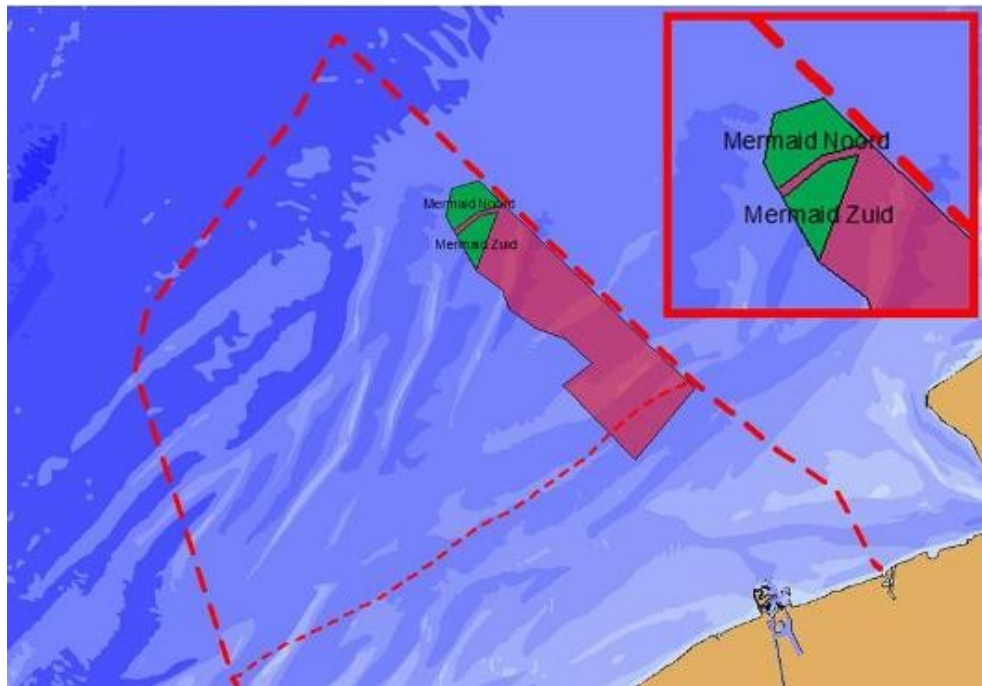


Figura 5.12 Mappa dell'area assegnata a Mermaid



Figura 5.13. Mappa del progetto FlanSea

### 5.1.13 Pilot Zone

Posizione	Portogallo
Anno avviamento	In costruzione, installazione dei primi WEC prevista nel 2014
Scopo del progetto	Sito di prova oceanico per sviluppatori di WEC

Nel 2010, lo stato portoghese, concesse a ENONDAS una locazione per la generazione di energia ondosa, in una zona pilota. La concessione è di 45 anni, e include l'autorizzazione di installare delle infrastrutture e di connessione all rete elettrica pubblica. Enondas utilizza il brand Ocean Plug. La Pilot Zone (PZ) portoghese ricopre un'area di circa 320 km<sup>2</sup> vicino a S.Pedro de Moel tra Figueira da Foz e Nazaré. L'obiettivo principale è di diventare uno spazio aperto sulla costa atlantica rivolto allo sviluppo dell'energia marina, soprattutto per il moto ondoso. L'accordo fu firmato il 20 ottobre 2010, e ENONDAS stese un piano di sviluppo per la Pilot Zone:

- Creazione di una zona di prova;
- Sviluppo della Pilot Zone così da poter ricevere i prototipi di generazione elettrica (basati sul moto ondoso o energia eolica) nel 2013, con un obiettivo di installare una struttura elettrica, che renderà possibile l'inserimento di 12 MW (4x3MW) nella rete di distribuzione.

Lo sviluppo dell'infrastruttura elettrica comprende:

- Quattro punti di connessione a 3MW, conversione del voltaggio imposta ai promotori a 15 kV;
- Quattro cavi sottomarini, che collegano i generatori a coppie ad una scatola di derivazione;
- Due cavi trifase intrecciati, che si connettono alla scatola di derivazione ad una stazione di derivazione con 15/30 kV di trasformazione e una capacità di 16 MVA;
- Connessione a una rete di distribuzione a Marinha Grande attraverso un cavo sottomarino[49]. Il finanziamento della prima fase della Pilot Zone fu recentemente approvato con un investimento di 15 milioni di euro che verranno investiti nell'infrastruttura della PZ, che deve essere completata entro la fine del 2013. La Pilot Zone preve l'impiego di progetti a moto ondoso per una capacità di generazione di 250 MW entro il 2020. La seconda fase della PZ inizierà nel 2014 e intenderà attrarre progetti allo stadio precommerciale e includerà progetti marini ed eolici offshore[30].

### 5.1.14 Perth Wave Energy Project

Posizione	Australia
-----------	-----------

Anno avviamento	2003, avviamento previsto nel 2014
Scopo del progetto	Ricerca e sviluppo del sistema CETO

Questo progetto, sarà la prima dimostrazione al mondo di un sistema CETO, su scala commerciale, connesso alla rete. Il progetto fornirà i primi guadagni a Carnegie, attraverso la vendita di elettricità verde, al Dipartimento della Difesa per la HMAS Stirling, ovvero la base primaria della Royal Australian Navy sulla costa occidentale dell'Australia, situata a Garden Island. Il progetto è previsto per il commissionamento, nel primo quadrimestre del 2014. Nel Maggio del 2012, alla PWEF fu assegnata la sovvenzione di \$9.9 milioni del Governo federale australiano, dal programma delle rinnovabili emergenti (ERP), dell'Agenzia per l'energia rinnovabile australiana. Questo è in tono con la sovvenzione del programma (LEED) per lo sviluppo dell'energia a basse emissioni del Governo dell'Australia occidentale. I fondi dell'Australia occidentale, proverranno dall'accordo sul fondo di \$12.5 milioni del governo regionale esistente della Carnegie, che venne precedentemente usato per la dimostrazione dell'unità commerciale CETO nel 2011. Siccome il PWEF è un progetto dimostrativo non commerciale, gli obiettivi chiave sono focalizzati principalmente sulla dimostrazione della fattibilità della tecnologia CETO, e per imparare dall'esperienza dell'impiego e del funzionamento di unità multiple di CETO e del completo sistema CETO[31]. Il progetto comprenderà l'installazione e il funzionamento di quattro unità CETO, il cui numero raddoppierà in futuro, sommerse e fissate al fondale marino. Queste vengono connesse a due condutture di piccolo diametro, disposte sul fondale, che conducono alla struttura di generazione di potenza situata sulla costa[32].

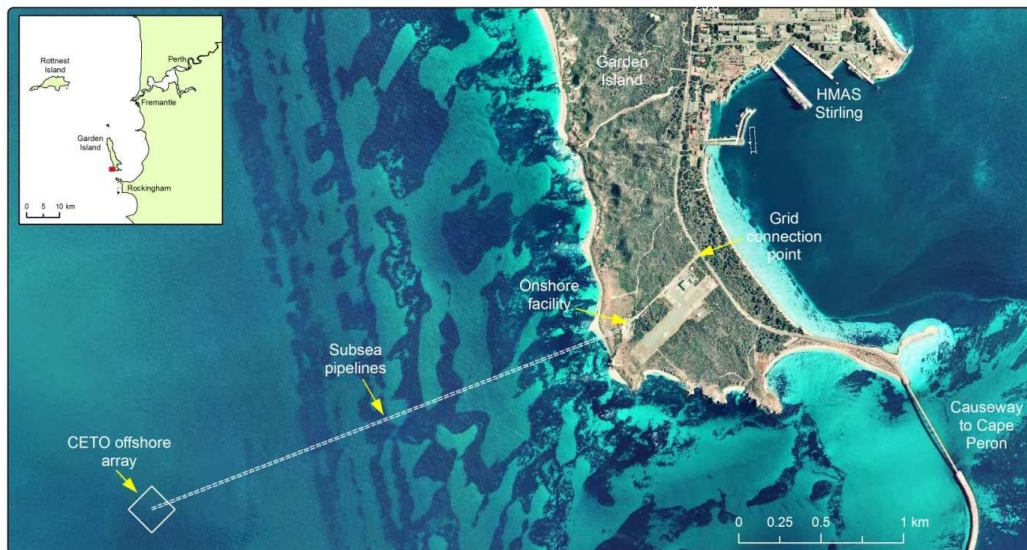


Figura 5.14. Vista aerea del Perth Wave Energy Project, Western Australia

## 5.2 Wave Farm

Si presentano le Wave Farm di maggior rilievo dal punto di vista dello sviluppo della tecnologia utilizzata e della prossimità di realizzazione. Le Wave Farm sono centrali elettriche a moto ondoso, sfruttano l'energia contenuta nelle onde del mare per produrre elettricità da immettere nella rete elettrica. Per raggiungere potenze installate dell'ordine delle decine o centinaia di megawatt, le wave farm adottano schieramenti di decine di dispositivi.

### 5.2.1 Limpet

L'impianto Limpet sull'isola di Islay, al largo della costa ovest della Scozia, è il primo impianto a moto ondoso su scala commerciale connesso alla rete elettrica. L'impianto fu commissionato nel Novembre del 2000. È un convertitore a moto ondoso onshore che utilizza il sistema a colonna inclinata d'acqua oscillante (OWC) con una turbina Wells come Power Take-Off. L'impianto Limpet viene anche utilizzato come base di prova, a grandezza naturale, per lo sviluppo di nuove turbine[18]. Dal 2000, Wavegen ha operato la centrale elettrica a moto ondoso sulla costa Limpet connessa alla rete, sull'isola scozzese di Islay. La camera di OWC è composta di cemento rinforzato ed è inclinata di 45°. L'aria sopra la superficie dell'acqua è guidata attraverso diverse aperture tonde che conducono alle turbine Wells. In origine, Limpet era equipaggiata con una turbina Wells da 500kW, che fu ridotta a 250kW. Il collettore ha una seconda apertura, che viene utilizzata per testare turbine più piccole, sempre connesse alla rete, e per fare esperienza nell'ottimizzazione e nel funzionamento di unità

di diverse dimensioni. Dopo sette anni di funzionamento continuo connesso alla rete, la turbina principale è stata rimossa, fornendo un ulteriore spazio di prova per sviluppi di turbine più nuove. Limpet ora funziona da enorme pompa ad aria per testare turbine a grandezza naturale, in condizioni reali di connessione alla rete. Il concetto della turbina Wells è stato dimostrato funzionare in condizioni meteorologiche estreme. Per esempio, nel primo inverno dopo l'installazione di Limpet a Islay, l'isola fece fronte all'onda più alta degli ultimi cinquant'anni, e il dispositivo resistette senza danni[33].



Figura 5.15. Vista d'insieme dell'impianto Limpet. Si noti in verde il condotto della turbina

### 5.2.2 Mutriku

Il servizio spagnolo Ente Vasco de la Energia (EVE) commissionò ufficialmente l'impianto a moto ondoso Mutriku nei Paesi Baschi, Spagna, in Luglio 2011. L'impianto genererà un output di 300kW, per alimentare 250 famiglie. Un investimento di €6.4m fu fatto per la struttura. Il progetto aiuterà nella riduzione di 600t di emissioni di anidride carbonica annuali. Ricevette supporto finanziario dal settimo programma quadro della Commissione europea. Il porto di Mutriku, che è situato nella Baia di Biscay, è colpito regolarmente da forti tempeste che spesso causano danni ai pontili. Le tempeste portano anche instabilità, e causano diversi incidenti alle barche. Per affrontare il problema, il governo basco approvò un piano di costruzione di un frangiflutti lungo 440m, composto da detriti. Dopo aver approvato il progetto del frangiflutti, il governo



basco si rivolse a EVE per sviluppare un impianto a moto ondoso che userà il frangiflutti senza influire sulle sue funzioni primarie. Furono esaminate diverse tecnologie e fu scelta la tecnologia della Voith Siemens Hydro di convertitore a colonna d'acqua oscillante (OWC), grazie al suo progetto semplice e non distruttivo. La costruzione dell'impianto di Mutriku iniziò nel 2006. Il convertitore a colonna d'acqua oscillante fu costruito nel sito di 100 metri di sezione del muro esterno della struttura frangiflutti[34].

#### *Caratteristiche tecniche*

Il progetto dell'impianto di Mutriku include una struttura vuota che forma una sagoma trapezoidale. La struttura ha un'apertura frontale, che è sommersa sotto l'acqua, e un'apertura in cima. L'apertura frontale è alta 3.20m. La struttura vuota contiene 16 camere d'aria che ospitano 16 turbine. Ogni turbina pesa 1,200kg ed è alta 2.83m e larga 1.25m. Le turbine non hanno una scatola di cambio, impianto idraulico o palette regolabili. Esse sono semplici, affidabili e lavorano con l'aria. Le turbine Wells sono connesse ad un turbogeneratore con una capacità di 18.5kW. Il turbogeneratore comprende una valvola a farfalla sul fondo per isolarlo se necessario. Iniettori d'acqua dolce puliscono le palette del turbogeneratore, per rimuovere gli accumuli di sale e altre impurità. L'impianto include anche un'attrezzatura di controllo e di condizionamento di potenza, un centro trasformatore e una linea di power take-off. La tecnologia OWC usata nell'impianto di Mutriku è fornita da Voith Siemens Hydro sussidiaria di Wavegen. La tecnologia è stata testata in un impianto di dimostrazione in Scozia dal 2000, e fu avviata commercialmente con la nuova struttura. La tecnologia può essere utilizzata in strutture frangiflutti già esistenti o nuove. Il concetto innovativo, permette all'infrastruttura marina esistente di essere utilizzata per la generazione di potenza, così minimizzando i costi di costruzione. L'acqua del mare entra nella camera d'aria della struttura frangiflutti attraverso l'apertura sul fronte. Quando l'acqua entra nella camera, l'aria presente viene compressa a pressione alta e spinta fuori dall'apertura in cima. L'alta pressione gira la turbina, che è connessa al generatore, producendo quindi elettricità. Quando l'acqua si ritira, l'aria viene decompressa, il che nuovamente fa girare la turbina. L'acqua del mare non viene mai in contatto con le turbine. L'elettricità viene generata solo con il movimento dell'aria. Questa caratteristica migliora largamente la vita dell'attrezzatura[35]. Commissionata nel 2011, è la prima centrale elettrica a moto ondoso del mondo ad essere contrattata con garanzie commerciali. Situata a Mutriku sulla costa atlantica della Spagna, questa centrale elettrica è il primo impianto a moto ondoso a funzionamento commerciale in piena vita.

- Cliente EVE – Ente Vasco de la Energia;
- Incorporazione in un nuovo frangiflutti;
- tecnologia multipla a colonna d'acqua oscillante;

- 16 turbo-generatori;
- Fornitura a circa 250 famiglie;
- Potenza stimata 300 kW;
- 7 anni di prove sul campo della tecnologia della turbina Limpet[36].



Figura 5.16. Vista della centrale ad OWC di Mutriku

### 5.2.3 Aguçadoura

Nel 2008 la Pelamis Wave Power si assicurò un ordine dalla compagnia elettrica portoghese Enersis per costruire la prima centrale a moto ondoso del mondo, al largo della costa nordoccidentale del Portogallo ad Aguçadoura. La centrale, composta di tre unità, aveva una capacità installata di 2,25 MW. Le tre macchine furono installate e azionate nel 2008, generando elettricità fornita alla rete. Tuttavia, il progetto finì prima del previsto, con le tre macchine in ritono al porto, a causa del collasso finanziario della compagnia affiliata alla Enersis, la Babcock & Brown. Nonostante questo fallimento, il progetto fu una pietra miliare estremamente importante per la Pelamis Wave Power, provante la capacità della compagnia a fornire, costruire e controllare un impianto di più macchine e di capire e risolvere le sfide ingegneristiche incontrate lungo il percorso[37].

#### *Problemi tecnici*

Due problemi tecnici principali si sono incontrati. Il primo riguardò la galleggiabilità della schiuma attaccata al sistema di connessione veloce sottomarino, non facente parte delle macchine, la sostituzione della quale causò un ritardo della prima installazione della macchina in Luglio. Il secondo riguardò i cuscinetti cilindrici della macchina in cui la strumentazione collegata rilevò un tasso di usura più alto di quanto ci si aspettasse. Questo si scoprì essere



dovuto a movimenti laterali difettosi della faccia dei cuscinetti cilindrici, che fu in seguito risolto[38].

### *Pelamis P2*

L'esperienza sfociò direttamente nel programma di sviluppo di due anni per la seconda generazione, il P2 Pelamis. La macchina Pelamis P2 è la macchina Pelamis di seconda generazione e include un numero di miglioramenti progettuali. La macchina di progetto P2 è stata venduta ai clienti di servizio E.ON e ScottishPower Renewables, e le macchine P2 vengono ora testate per una serie di progetti su scala commerciale. A 180m di lunghezza, 4m di diametro e circa 1350 tonnellate di peso (principalmente zavorra di sabbia), il Pelamis P2 è più largo, più lungo e più pesante della macchina di progetto P1. Questo permette al Pelamis di catturare più energia mentre riduce sostanzialmente il costo per MW. Composto di 5 tubi e perciò di quattro giunti, il P2 ha un tubo extra e un modulo extra di potenza. Un sistema di Power Take off migliorato con efficienze più alte, una risoluzione potenziata di controllo e un'affidabilità aumentata. L'angolo dell'involucro di giunzione è stato aumentato permettendo movimenti del giunto più grandi per aumentare significativamente l'assorbimento di potenza negli stati del mare. Diversamente dalle componenti separate del P1, i moduli di potenza sono ora integrati nelle componenti principali del tubo. Un giunto universale che permette due gradi di libertà sostituisce i giunti a un solo grado di libertà[39]. Nel 2009, le compagnie elettriche EDP e Efacec comprarono la quota di Enersis in CEO, a seguito del collasso della compagnia madre Babcock & Brown, nella bancarotta finanziaria. CEO ora ha ambizioni per un progetto da installare, conseguente ad Aguçadoura. Si tratta di un progetto suddiviso in fasi; una centrale di 26 macchine con una capacità installata di 20 MW. La cronologia per questo progetto dipenderà dal lavoro di prova tuttora in corso del P2 Pelamis[40].

Tabella 5.3. Dettagli del nuovo progetto di impiego della tecnologia Pelamis ad Aguçadoura[41]

Cliente	EDP & Efacec
Posizione	5km al largo della costa atlantica del Portogallo settentrionale (stazione secondaria di Aguçadoura)
Progetto	Aguçadoura fase 2
Capacità	20MW di installazione per gradi, con l'intenzione di espandersi
Status	Sviluppo prematuro



Figura 5.17. Vista dei macchinari Pelamis P1 installati ad Agucadoura

#### 5.2.4 Bernera

Bernera è la prima centrale a moto ondoso nelle Western Isles al largo di Bernera, Regno Unito. Pelamis Wave Power, la compagnia per il moto ondoso più avanzata al mondo, ha allacciato un accordo di allocazione con la Crown Estate per sviluppare una centrale a moto ondoso, grande abbastanza per alimentare circa 7000 abitazioni. Il permesso di produrre fino a 10MW, è garantito dall'accordo per un sito, situato al largo della costa occidentale di Lewis, vicino all'isola di Bernera, e con la costruzione prevista per il 2015, diverrebbe la prima centrale a moto ondoso commerciale delle Western Isles. I tempi coincidono con i miglioramenti previsti della rete elettrica dell'isola, ed il completamento dello sviluppo pre commerciale della tecnologia Pelamis alle Orkney da parte dei clienti di servizio E.ON e ScottishPower Renewables. La centrale a moto ondoso consisterà di 14 macchine Pelamis, e sarà posizionata tra uno e dieci chilometri dalla costa. Il sito stesso è grande circa 100 km<sup>2</sup>, che permette a Pelamis di restringere la posizione per la centrale a moto ondoso finale, che occuperà pressapoco 2 km<sup>2</sup> una volta costruita[42].



Figura 5.18. Sito di installazione della centrale Bernera

### 5.2.5 Aegir

Fondata nel 1909, Vattenfall è il sesto più grande produttore europeo di elettricità, e il più grande produttore di energia termica, che opera nella generazione, distribuzione e vendita. La società madre, Vattenfall AB, è 100% posseduta dallo stato svedese. Vattenfall è l'ultima compagnia ad assicurare un ormeggio di prova nel sito di test del moto ondoso a Billia Croo nelle Orkney, dove intendono testare l'ultima generazione di dispositivi della pelamis Wave Power nel 2014[43]. Vattenfall ha formato una compagnia di joint venture, Aegir Wave Power, assieme alla compagnia scozzese di tecnologia per il moto ondoso Pelamis Wave Power. Aegir completò con successo le negoziazioni con la Crown Estate nel Maggio 2011, per riservare un sito della costa sud-ovest delle Shetland, per lavorare verso lo sviluppo di una centrale a moto ondoso. Aegir sta iniziando ora con lo studio pratico e col lavoro di pianificazione. E' stato avviato un programma esteso di misurazioni, incluse le valutazioni della risorsa ondosa, l'ecologia, l'archeologia, e le valutazioni sul rischio di navigazione[44]. Il sito potrebbe iniziare a generare elettricità per il 2015. Aegir ha intenzione di installare i 14 convertitori a moto ondoso P2 da 750 kW nel sito di 2 km<sup>2</sup>, grossomodo 10km da terra, come parte di una fase di inizio da 10MW. A posteriori, lo sviluppo potrebbe comprendere 26 di questi dispositivi

serpeggianti, ormeggiati e distanziati 300 metri, con una interconnessione a catena (in serie) a formare un complesso di 20MW, alimentando così 26000 case. Ogni macchina, 180 metri di lunghezza e 1300 tonnellate di peso, genererebbe potenza a 690 V di corrente alternata, che verrebbe incrementata dai trasformatori[45].

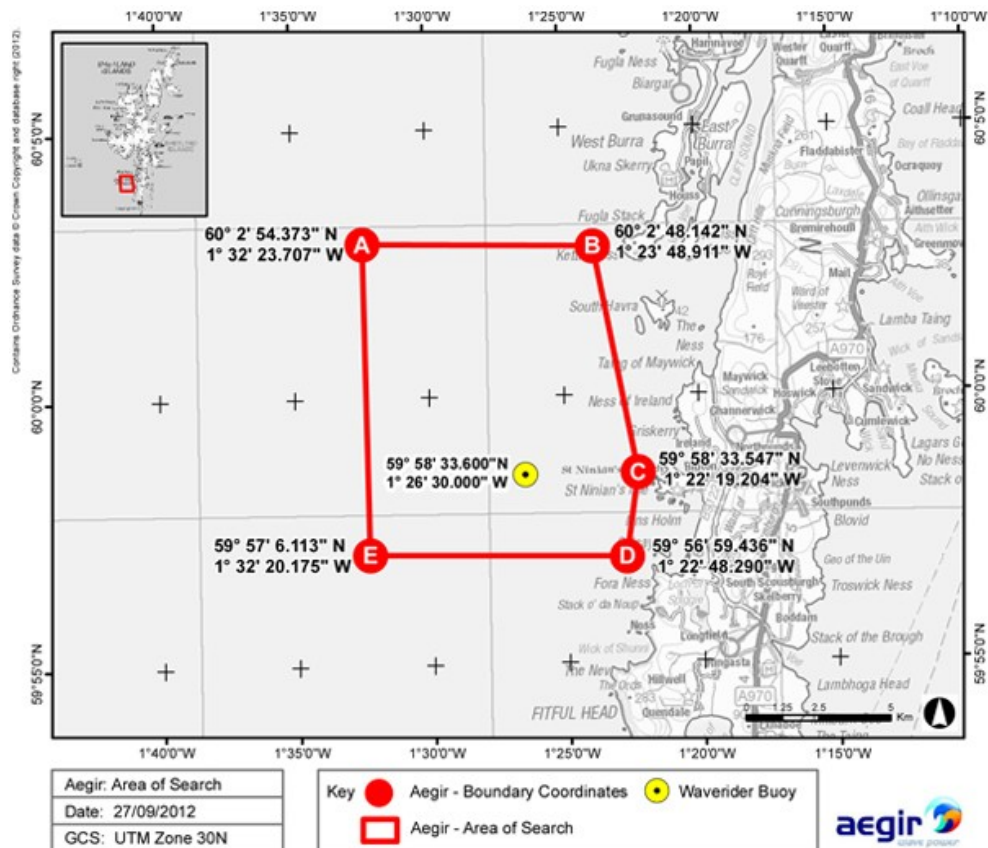


Figura 5.19. Mappa del sito di sviluppo del progetto Aegir

La centrale verrà costruita in stadi con le prime macchine commissionate probabilmente nel 2018 con alcuni lavori di costruzione che potrebbero iniziare nel 2017. I tempi dipendono da diversi aspetti, quali i permessi al progetto e la fornitura della connessione HVDC (Alto voltaggio a corrente continua) prevista tra le Shetland e la Scozia[46].



Figura 5.20. Sito di installazione della centrale

### 5.2.6 Lewis Wave Energy Farm

Nel Maggio del 2013, Aquamarine Power ha ricevuto pieno consenso da parte del governo scozzese, per una centrale a moto ondoso da 40 MW al largo della costa nord-ovest di Lewis, Scozia, facendone il sito energetico oceanico più grande al mondo. L'annuncio fu fatto dal Ministro scozzese per l'Energia, l'impresa e il turismo Fergus Ewing, durante la conferenza All Energy in Aberdeen. Grazie al permesso del governo e del suo regolatore Marine Scotland, con la pianificazione del settore onshore, che fu approvata a Settembre, con la sua società sussidiaria Lewis Wave Power Limited, Aquamarine Power potrà iniziare a installare le sue macchine a energia ondosa Oyster. Verranno installate nel sito nei prossimi anni, una volta che l'infrastruttura di rete necessaria sarà implementata. Questo vedrà alla fine lo spiegamento di 40 o 50 dispositivi Oyster lungo la costa a Lag na Greine, vicino a Fivepenny Borve, in una delle migliori posizioni per il moto ondoso in Europa. Una volta completata, la centrale avrà la capacità di alimentare circa 30,000 abitazioni. Aquamarine Power sta tuttora testando la loro seconda macchina a grandezza naturale, conosciuta come Oyster 800, all'EMEC nelle Orkney, producendo potenza elettrica per la rete elettrica. Durante l'annuncio del progetto, il Ministro per l'energia, l'impresa e il turismo Fergus Ewing disse: "Tuttavia, noi non possiamo dimenticare che questo è il tipo di premio che può essere perso a meno che i costi per i progetti da connettere alla rete sulle isole siano posti ad un livello competitivo.". Lang Banks, Direttore del WWF Scozia disse: "Questo annuncio è una spinta fantastica per il settore scozzese delle rinnovabili marine.(...) Tuttavia, se la Scozia intende dominare nel campo del moto ondoso, allora è importante che si risolva velocemente il problema della connessione alla rete e dei costi di trasmissione alle isole scozzesi."[47].

### 5.2.7 Reedsport OPT Wave Park

Posizione	Oregon, Stati Uniti
Anno avviamento	2003
Scopo del progetto	Sito di prova oceanico per sviluppatori di WEC

Il 13 Agosto 2012 FERC garantì a Ocean Power Technologies (OPT) una licenza commerciale per la costruzione del Reedsport OPT Wave Park Project da 1.5MW connesso alla rete. Questa è la prima licenza commerciale rilasciata per un progetto a moto ondoso negli Stati Uniti d'America. La licenza fornisce il permesso per l'impiego di dieci dispositivi di OPT connessi alla rete per 35 anni. OPT sta lavorando con il processo di permessi e di licenza per espandere il sito fino a 50MW di capacità. Questa espansione viene chiamata fase III, e ricevette un permesso preliminare il 15 Marzo 2011. Dal 2009 al 2011 OPT testò il suo PowerBuoy da 40kW in 30m di profondità, approssimativamente tre quarti di miglio al largo della base della marina militare della baia di Kaneohe a Oahu, diventando il primo dispositivo a moto ondoso connesso alla rete negli Stati Uniti. Il WEC di OPT da 150 kW (PB150), inizialmente programmato per l'impiego nel 2012, fu posticipato dai ritardi meteorologici e sarà quindi varato nel 2013. Questo progetto raccoglierà dati dettagliati durante i due anni di funzionamento. In aggiunta, OPT prevede di testare i suoi dispositivi da 500kW (PB500) agli inizi del 2013[51]. La schiera di dieci PowerBuoy PB150 includeranno una sottostazione sottomarina a capsula per raccogliere la potenza generata, e un cavo sottomarino elettrico per trasmettere l'elettricità rinnovabile alla rete elettrica del nordovest pacifico. Ogni PB150 PowerBuoy ha un massimo di capacità di generazione di 150 kW. Dopo che il primo PowerBuoy iniziale viene installato, OPT pianifica di costruire il resto della centrale a moto ondoso, che consiste di nove PowerBuoy addizionali e di un'infrastruttura di connessione alla rete elettrica. La quantità di elettricità stimata di questo progetto, fornirà alla rete circa 4,140 MWh/anno sulla base della risorsa ondosa di questo luogo, sufficienti per 375 abitazioni. L'elettricità generata dal sistema PowerBuoy pulita e rinnovabile soppianta 2,110 tonnellate di anidride carbonica annuale. La richiesta del permesso preliminare del progetto Reedsport può garantire fino a 50MW, per un'espansione futura potenziale del sito[48].

Tabella 5.4. Dettagli del progetto di Reedsport di OPT[49]

Posizione	Reedsport, Oregon, USA
Stato	Valutazione ambientale e permesso in corso



Capacità totale di generazione	Fino a 1.5 MW nel primo stadio
Specifiche del convertitore	PB150
Impiego	Connesso alla rete
Componenti principali	Fino a 10 PowerBuoy PB150, una sottostazione sottomarina a capsula (USP), un cavo sottomarino dalla schiera di PowerBuoy alla sottostazione a terra
Generazione annuale stimata	Approssimativamente 4140 MWh
Risparmio stimato di CO2	Circa 2,110 t/anno

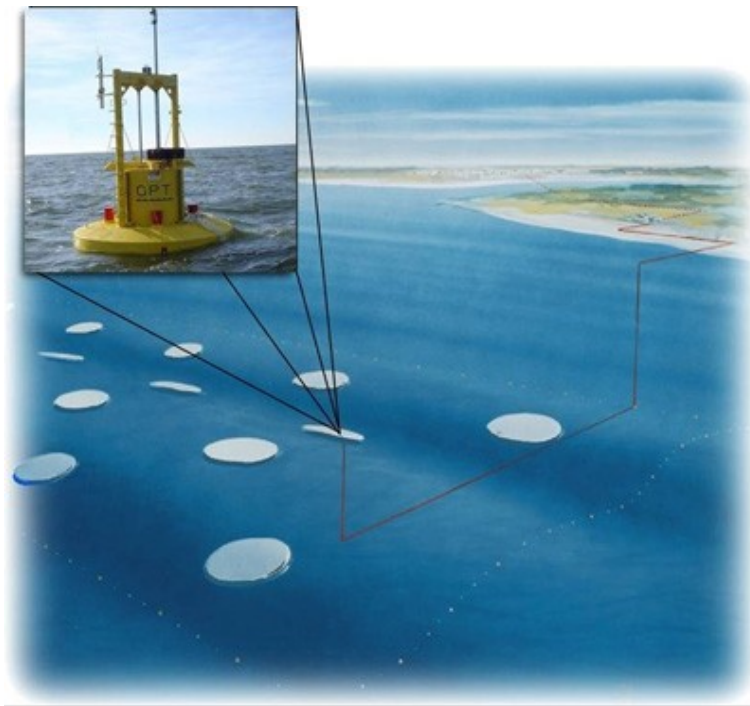


Figura 5.21. Grafica del progetto Reedsport Wave Park

### 5.2.8 Coos Bay OPT Wave Park

OPT sta proponendo di sviluppare un parco ondoso commerciale, a grandezza naturale, in Nord America a Coos Bay, Oregon. La dimensione pianificata del parco è di 100 MW, e sarà il più grande progetto energetico ondoso del mondo, quando sarà completato. Il parco ondoso sarà situato a circa 2.7 miglia al largo dalla costa dell'Oregon, ad ovest delle città di Coos Bay e di North Bend. Il Coos Bay OPT Wave Park utilizzerà i PowerBuoy di prossima generazione della



OPT PB500. Il parco ondoso consisterà di 200 PowerBuoy, 20 sottostazioni sottomarine, e un cavo sottomarino, per fornire l'elettricità generata da questo parco ondoso, nella rete elettrica del Pacific Northwest. Ogni PowerBuoy PB500 è progettato per una capacità di generazione massima sostenuta di 500 kW[50].

Tabella 5.5 Dettagli del progetto CoosBay di OPT[51]

Posizione	Coos Bay, Oregon, USA
Stato	Avviso di intento e richiesta preliminare inviata
Capacità totale di generazione	100 MW
Specifiche del convertitore	PB500
Impiego	Connesso alla rete
Componenti principali	20 sottostazioni sottomarina a capsula (USP), un cavo sottomarino dalla schiera di PowerBuoy alla sottostazione a terra
Generazione annua stimata	275000 MWh
Certificati di energia rinnovabile	275000 MWh
Risparmio di CO2 stimata	140250 t/anno

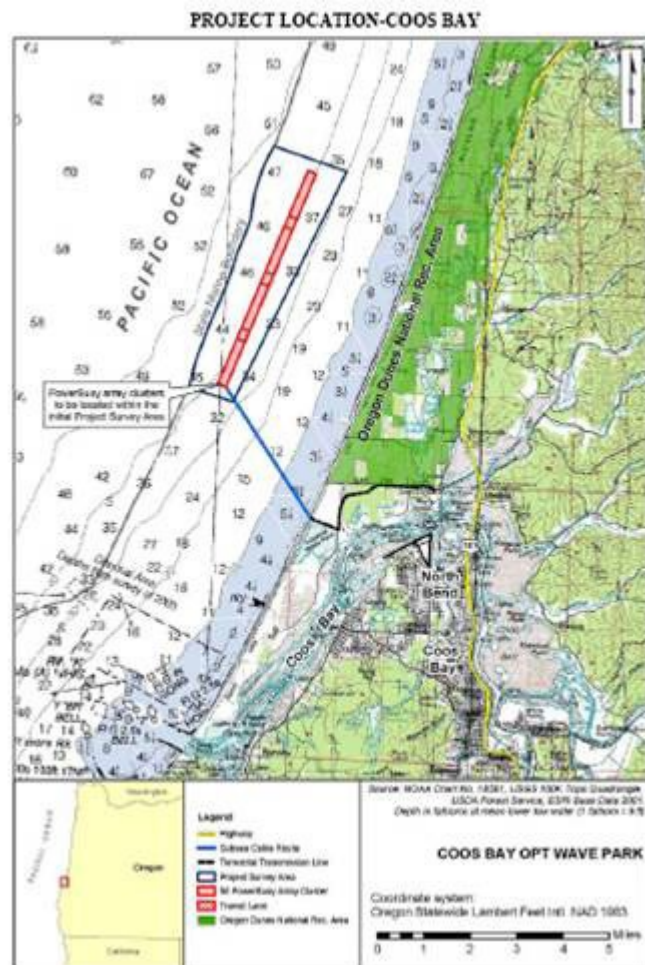


Figura 5.22. Mappa geografica del futuro progetto di Coos Bay Wave Farm

### 5.3 Wave farm in Italia

Le tecnologie per la conversione del moto ondoso sviluppate in Italia, sono oggetto di progetti concreti di sviluppo di veri e propri parchi a moto ondoso o wave farm lungo le coste italiane. Enel Green Power assieme a 40SouthEnergy, il Politecnico di Torino e l'Università degli studi Mediterranea di Reggio Calabria hanno deciso di investire le proprie energie per testare i propri dispositivi a grandezza naturale in mare aperto, col fine di sfruttare commercialmente il moto ondoso con schieramenti di dispositivi multipli. In questo capitolo si presentano i progetti più importanti in corso d'opera.

#### 5.3.1 Iswec

Nel progetto Iswec di Wave For Energy, spinoff del Politecnico di Torino, sono stati studiati tre differenti siti di installazione nel Mar Mediterraneo:

- La Spezia, per lo studio di un sistema integrato di approvvigionamento energetico per l'isola di Gorgona;
- Alghero, perchè è uno dei siti d'installazione con la maggior potenza d'onda disponibile;
- Pantelleria, è in corso un progetto per l'installazione di una wave-farm da 1 MW.

Tabella 5.6. Produttività annua di un impianto da 1 MWp di dispositivi Iswec[52]

Località	Produzione energetica annua
La Spezia	2'080 MWh/anno
Alghero	3'110 MWh/anno
Pantelleria	2'600 MWh/anno

Dai risultati ottenuti dagli studi si evince come la produzione di energia da moto ondoso sia interessante anche per bacini chiusi come il mar Mediterraneo. Questa risorsa energetica risulta conveniente anche rispetto alle tradizionali fonti di energia rinnovabile, fotovoltaico ed eolico, sia in termini di produttività sia in termini di ingombri e impatto ambientale. Di seguito si confrontano le caratteristiche energetiche di tre risorse rinnovabili: il moto ondoso, il fotovoltaico e l'eolico. I dati sembrano favorire l'energia marina.

Tabella 5.7. Confronto tra le densità energetiche delle differenti risorse rinnovabili[53]

Moto ondoso	Fotovoltaico	Eolico
Oltre 3'000 MWh/MWp	1'200 MWh/MWp	2'000 MWh/MWp
15'000 m <sup>2</sup> /MWp	20'000 m <sup>2</sup> /MWp	15'000 m <sup>2</sup> /MWp

### *Pantelleria*

L'Isola di Pantelleria è un ottimo sito di prova per lo sfruttamento della risorsa ondosa. La lontananza dalla terraferma rende dispendioso l'approvvigionamento energetico oggi basato prevalentemente sul petrolio. L'isola ha una seria intenzione di cambiare il proprio asset energetico, riducendo i consumi ed aumentando in maniera significativa la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Sull'isola è installato un impianto per la produzione di energia elettrica di proprietà della società SMEDE. L'impianto è costituito da sei gruppi

diesel più due turbine a gas per una potenza installata complessiva di 22,108 MW. Nel 2009 la centrale SMEDE ha prodotto 43.536 MWh di energia elettrica. L'incremento complessivo rispetto al 1990 è del 133%. I consumi di gasolio della centrale, nel 2009, sono stati pari a 9.300 tonnellate. A seguito degli interventi riguardanti l'incremento di efficienza energetica, il sistema energetico di Pantelleria subirà, nei prossimi anni, delle profonde modifiche. Per quanto riguarda l'energia elettrica, il consumo complessivo è previsto diminuire, nei prossimi 10 anni, del 29%, passando da 37.400 MWh a 26.600 MWh[54]. La società W4E, Wave for Energy (spin off del Politecnico di Torino) vuole installare un parco della potenza di circa 1 MW composto da 16 dispositivi. Avvalendosi dell'esperienza accumulata nella progettazione e messa in opera dei diversi prototipi realizzati, sono stati già identificati i potenziali fornitori delle componenti meccaniche, elettriche e nautiche. Da un'attenta analisi, il costo iniziale di questa prima installazione potrebbe attestarsi di poco al di sopra dei 5 milioni di euro. Questa cifra, dato lo stadio prototipale precommerciale dell'installazione, è più che interessante, soprattutto se confrontata con cifre che per i competitor si aggirano intorno a 8/9 milioni di euro (data la maggior complessità tecnologica). Prendendo in considerazione un'economia di scala è oggettivamente possibile stimare una riduzione del costo di una tale installazione intorno al 30 per cento, raggiungendo la quota di 3,5 milioni. Il breakdown dei costi della wave farm presso Pantelleria è rappresentato in Figura 10.1[55].

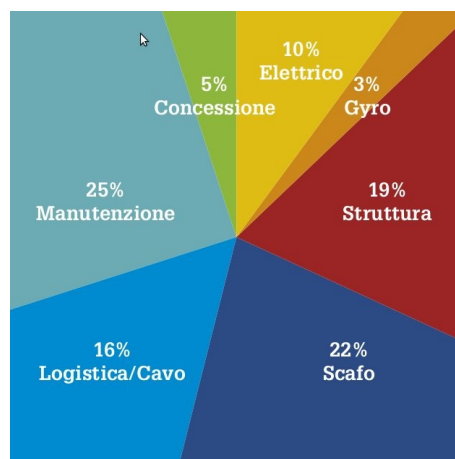


Figura 5.23. Breakdown dei costi per un'installazione di 1MW a Pantelleria

Manutenzione, scafo, struttura e logistica/cavo rappresentano le principali voci di costo. Scafo e manutenzione sono stati calcolati in modo conservativo da W4E, dal momento che rappresentano due elementi essenziali per il successo tecnico-economico del progetto. Per la componente logistica/ cavo, inoltre, è stata considerata l'installazione di un cavo sottomarino di proprietà. Per

finanziare questo progetto W4E farà affidamento ad un leasing operativo. Le performance tecnico-economiche del sistema sono riportate invece in Tabella 10.3[56].

Tabella 5.8. Performance tecno-economica del sistema[57]

Produttività Pantelleria	2600 MWh/anno
Productivity Factor	29,7%
Incentivo tariffa omnicomprensiva (primi 15 anni)	340,00 euro/MWh
Tariffa Enel (dopo il 15° anno)	0,087 euro/kWh

Tenendo in considerazione il costo annuale di manutenzione dei sistemi e concessione dello spazio acqua, la performance del sistema è riassunta in Figura 10.2.

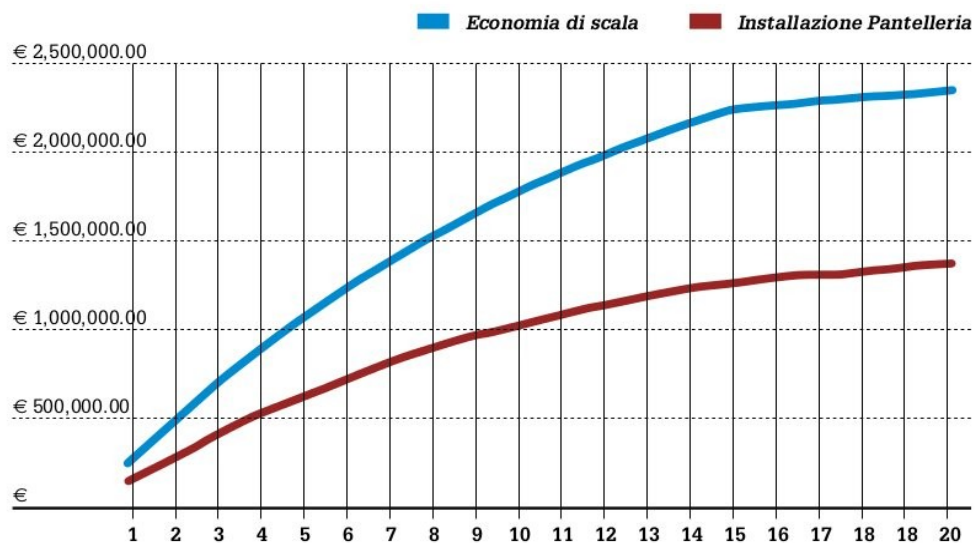


Figura 5.24. Performance economica della wavefarm a Pantelleria (confronto con economia di scala)

Anche con un'installazione pre-commerciale del sistema ISWEC presso Pantelleria, il VAN (Valore Attuale Netto) dell'investimento su un arco temporale di 20 anni si attesta intorno a 1,5 milioni di euro, mentre si incrementa a circa 2,5 milioni di euro considerando un fattore di economia di scala. In conclusione, è importante notare che:

- Anche in fase pre-commerciale l'installazione di una wave farm con sistemi ISWEC appare finanziariamente interessante;

- Se ISWEC è in grado di autosostenersi economicamente nel Mediterraneo, esso può garantire una prospettiva di finanziamento molto interessante nell'Oceano e anche per ulteriori installazioni in bacini chiusi come il Mediterraneo stesso (per esempio, la Sardegna)[58].

La durata dell'impianto è prevista essere di 20 anni e il ritorno dell'investimento si ha in sei anni[59]. Le caratteristiche del sito e del dispositivo vengono riassunte nella seguente tabella[60]:

Tabella 5.9. Caratteristiche del progetto a Pantelleria

Potenza ondosa media a pantelleria	9-10 kW/m
Potenza nominale dispositivo	60 kW
Dimensioni	16 x 18 m di larghezza per lunghezza
Peso totale	290 t
Peso del volano	3.2 t
Momento d'inerzia del volano	48550 kgm <sup>2</sup>
Velocità massima volano	300 rpm
Diametro del volano	2455 mm
Caratteristiche wavefarm	17 dispositivi da 60 kW ciascuno

Con i dati forniti si ipotizza che circa il 10% del fabbisogno di energia elettrica di pantelleria verrà fornito dal parco a moto ondoso da 1MW<sub>p</sub>. Infatti[61]:

Tabella 5.10. Approvvigionamento energetico del moto ondoso a Pantelleria nel 2020

Fabbisogno energia elettrica 2020	26600 MWh
Produzione di energia elettrica parco	2600 MWh
Quota di energia prodotta dalla wavefarm	9,8%

### 5.3.2 40SouthEnergy

Nel Giugno 2013 Enel Green Power, società leader mondiale nella generazione da fonti rinnovabili, e 40South Energy, gruppo di società tra le più innovative nel settore del marine energy a livello internazionale, hanno avviato l'installazione e messa in esercizio di un primo generatore R115, con una

capacità nominale di 150 kW e di potenza installata pari a circa 100 kW, per la conversione in elettricità dell'energia prodotta dalle onde del mare dell'Arcipelago Toscano, a Punta Righini (Castiglioncello). Il generatore assicura una completa integrazione nell'ambiente marino e facilità di manutenzione, e sarà in grado di produrre circa 220 MWh all'anno, sufficienti a soddisfare i consumi di oltre 80 famiglie. La generazione marina di energia è una soluzione particolarmente utile nei casi in cui risulti difficile il collegamento alla rete di distribuzione elettrica, come, ad esempio, per le isole[62].

Il Membro Inferiore della prima macchina R115 fu calato in mare da un cantiere navale a Pisa. Il commissionamento continuerà, con il completamento che avverrà per metà Settembre nel sito di prova a Punta Righini in Toscana[63]. Il sito di prova si trova circa 1.5Nm al largo di Castiglioncello, in Toscana. Il clima ondoso è relativamente calmo, nonostante ci siano degli eventi estremi occasionali. Ad esempio, a Dicembre 2011 ci fu una tempesta con onde alte 6m e periodi di 10s in mari molto forti, con condizioni dure come quelle oceaniche, dove le onde sono più grandi ma molto più regolari. Al momento il sito non è connesso alla rete elettrica, anche se stiamo valutando la possibilità di porre un cavo per mettere in produzione le macchine. Nel Marzo del 2013 il sito ha ottenuto le autorizzazioni all'installazione di quattro macchine. Uno dei pochi al mondo in grado di ospitare convertitori a moto ondoso a grandezza naturale in un ambiente offshore ed energetico. L'area utilizzata per il WEP (Wave Energy Park) è molto piccola: circa 300m x 250m, che può sembrare grande a terra ma è assolutamente trascurabile se si trova tre chilometri dalla costa. In particolare non interferisce assolutamente con la pesca, essendo le macchine a 47m di profondità, o con la navigazione commerciale, essendo più vicino alla costa di qualsiasi rotta commerciale, o con la navigazione ricreativa, essendo fuori da qualsiasi rotta di connessione tra porti. Sono in progetto in Italia altri siti di test, un altro WEP al largo di Lavagna, a Gorgona e all'isola d'Elba. Questi ultimi sono isole e quindi lo sfruttamento del moto ondoso contribuirebbe con una fonte rinnovabile al fabbisogno energetico delle comunità che vi abitano. Il che è uno dei vantaggi più importanti di questo tipo di risorsa[64].

### 5.3.3 Rewec 3

Negli ultimi anni l'attenzione nel campo del settore marittimo si è rivolta sulle tematiche del risparmio energetico e dello sfruttamento di fonti rinnovabili. I porti costituiscono le aree di maggiore interesse, siano essi commerciali, e quindi di grandi dimensioni, siano essi turistici e quindi di dimensioni più limitate e con un fabbisogno energetico minore. L'obiettivo è quello di realizzare dei veri e propri Green Ports., ovvero delle infrastrutture che siano in grado di soddisfare il fabbisogno interno di energia elettrica, e che, in ottica della integrazione porto-città, possano mettere a disposizione, in ambito urbano,



l'energia prodotta in surplus. In un porto turistico, la produzione di energia elettrica dalle onde, potrebbe realmente rendere i porti sostenibile dal punto di vista ambientale, abbattendo in maniera drastica il livello di emissioni inquinanti. I green ports oggi appaiono non più una ipotesi lontana, bensì una realtà valida da implementare, visti anche i capitali, pubblici e privati, che negli ultimi anni sono stati investiti[65].

Tabella 5.11. Energia elettrica prodotta in media, in un anno da una diga di 1km di lunghezza[66]

Mare Tirreno:	4-6,000MWh/km
Canale di Sicilia:	7,000MWh/km
Sardegna (costa occidentale):	10,000MWh/km
Coste atlantiche EU:	40,000MWh/km
California:	65,000MWh/km

#### *Porto di Civitavecchia*

Nel mese di Novembre 2012 è iniziata la costruzione di 19 cassoni REWEC3 per il Porto di Civitavecchia. Per una potenza installata di 10 MW[68]. I cassoni REWEC 3, che saranno posizionati sul molo di sottoflutto della nuova darsena servizi, da completarsi nei prossimi due anni e mezzo, hanno la capacità di sfruttare anche un moto ondoso molto contenuto e in particolare le onde lunghe[69]. Il primo prototipo di un cassone REWEC3 è in corso di realizzazione nell'ambito dei lavori del Porto di Civitavecchia denominati "PROLUNGAMENTO DELL'ANTEMURALE C. COLOMBO, DARSENE SERVIZI E TRAGHETTI". I lavori sono stati appaltati dall'Autorità Portuale di Civitavecchia, Fiumicino e Gaeta ed aggiudicati al raggruppamento di imprese con capofila Grandi Lavori Fincosit S.p.A[70]. L'allora primo ministro Monti spiegò che "L'Autorità Portuale oltre ad impegnarsi per far realizzare e posizionare i cassoni "REWEC 3" sul molo di sottoflutto della nuova darsena servizi, che sarà completata entro i prossimi due anni e mezzo, interverrà direttamente investendo circa 1 milione di euro per l'acquisto delle prime due turbine per la produzione di energia elettrica. L'obiettivo è quello di arrivare a 10 MW di potenza grazie ai cassoni cellulari in grado di sfruttare anche un moto ondoso molto contenuto"[71].

#### *Porto di Formia*



Figura 5.25. Rappresentazione tridimensionale della sezione del cassone REWEC3 all'interno della diga di sopraflutto del Marina di Cicerone. Fonte [avenergy.it](http://avenergy.it)

La Fig.10.3 riporta un'immagine tridimensionale del Marina di Cicerone, con una sezione del cassone attivo REWEC3. Il cassone di tipo REWEC3/3, in grado di assorbire l'energia del moto ondoso e produrre energia elettrica, ha larghezza complessiva di 36.5m e n.8 celle attive indipendenti, in ciascuna delle quali andrà installata una turbina, con una potenza installata totale di 160 kW[72].

#### *Porto di Salerno*

L'attuale barriera frangiflutti del porto di Salerno verrà allungata di 200m. A questo scopo, l'autorità del porto di Salerno ha già pianificato di implementare nella nuova struttura una tecnologia composta da cassoni frangiflutti modificati per incorporare l'impianto Rewec3 . L'allungamento totale di 200m verrà realizzato con dieci cassoni Rewec3 ad una profondità del mare di 11.5m, ognuno lungo 20m[74].



Figura 5.26. Vista aerea del porto di Salerno. La nuova barriera frangiflutti verrà costruita ad estensione di quella già presente, per una lunghezza di 200m.

## Capitolo 6

# Esempio di dimensionamento di un impianto e stima delle potenzialità della ricerca in Italia

### 6.1 Dimensionamento di una wave farm in Irlanda

Scopo di questo dimensionamento è di avere un'idea delle grandezze in gioco quando si parla di wave farm e di potenze installate elevate. L'Irlanda è la nazione in Europa con il mare più energetico assieme alla Gran Bretagna. Il governo irlandese ha già pianificato di voler portare lo sfruttamento del moto ondoso ad un livello significativo tra le risorse rinnovabili del paese. Entro il 2020, come preannunciato nel paragrafo 4.1, l'Irlanda intende avere una potenza ondosa installata pari a 500MW. Il dimensionamento qui riportato ipotizza di soddisfare tale pretesa attraverso l'utilizzo della sola macchina Pelamis. Il sito di riferimento per questo progetto è quello di Belmullet., di cui si riportano i valori orari delle onde per altezza e periodo significativi nella tabella della figura 6.1. Il convertitore a moto ondoso Pelamis è una delle tecnologie più promettenti sul mercato di cui si conoscono i parametri necessari al dimensionamento, quali la matrice della potenza elettrica generata da un dispositivo in base all'altezza e al periodo significativi dell'onda. Nel caso della macchina Pelamis da 750 kW questo è riportato nella seguente tabella[12]:

	Period ( $T_z$ )													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Height ( $H_s$ )	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	29	37	38	35	29	23	0	0	0
1.5	0	0	0	0	32	65	83	86	78	65	53	42	33	0
2	0	0	0	0	57	115	148	152	138	116	93	74	59	0
2.5	0	0	0	0	89	180	231	238	216	181	146	116	92	0
3	0	0	0	0	129	260	332	332	292	240	210	167	132	0
3.5	0	0	0	0	0	354	438	424	377	326	260	215	180	0
4	0	0	0	0	0	462	540	530	475	384	339	267	213	0
4.5	0	0	0	0	0	544	642	628	562	473	382	338	266	0
5	0	0	0	0	0	0	726	707	670	557	472	369	328	0
5.5	0	0	0	0	0	0	750	750	737	658	530	446	355	0
6	0	0	0	0	0	0	750	750	750	711	619	512	415	0
6.5	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	658	579	481	0
7	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	613	525	0
7.5	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	686	593	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	625	0
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	750	750	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	750	0
10.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.1. Matrice di dispersione della potenza prodotta dal Pelamis in kW

Mentre la matrice di dispersione dei valori delle ore di incidenza delle onde in base al loro periodo ed altezza nel sito di Belmullet è[13]:

		Period (T <sub>z</sub> )												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Heights (H <sub>z</sub> )	<i>Ireland</i>													
	0.5				17	39	13	0	0	0	4	0	0	0
	1				148	312	93	32	13	0	1	0	0	0
	1.5				75	560	372	187	64	11	2	0	0	0
	2				6	427	623	321	172	47	8	0	0	0
	2.5					99	508	363	182	67	10	0	0	0
	3					10	248	394	193	83	18	2	0	0
	3.5						86	436	244	74	15	7	1	1
	4						14	213	246	97	23	7	8	0
	4.5							83	218	124	22	4	3	2
	5								175	118	26	3	5	3
	5.5								88	122	36	2	1	0
	6								30	86	37	3	3	0
	6.5									45	32	4	4	1
	7									24	48	15	4	0
	7.5									9	30	10	2	0
	8									2	20	16	4	0
8.5										10	9	7	0	
9										5	18	1	2	
9.5										2	8	2	0	
10										1	4	0	1	
10.5											1	0	0	

Figura 6.2. Grafico a superficie delle ore di incidenza delle onde in base al periodo e all'altezza significativi del sito irlandese di Belmullet.

Se si moltiplica il numero di ore per i kWh di energia elettrica prodotta si ricava la seguente matrice:

Height (H <sub>s</sub> ) [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.5				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1				0	0	2,697	1,184	0,494	0	0,029	0	0	0
1.5				0	17,92	24,18	15,521	5,504	0,858	0,13	0	0	0
2				0	24,339	71,645	47,508	26,144	6,486	0,928	0	0	0
2.5				0	8,811	91,44	83,853	43,316	14,472	1,81	0	0	0
3				0	1,29	64,48	130,808	64,076	24,236	4,32	0,42	0	0
3.5				0	0	30,444	190,968	103,456	27,898	4,89	1,82	0,215	0,18
4				0	0	6,468	115,02	130,38	46,075	8,832	2,373	2,136	0
4.5				0	0	0	53,286	136,904	69,688	10,406	1,528	1,014	0,532
5				0	0	0	12,342	123,725	79,06	14,482	1,416	1,845	0,984
5.5				0	0	0	0	66	89,914	23,688	1,06	0,446	0
6				0	0	0	0	22,5	64,5	26,307	1,857	1,536	0
6.5				0	0	0	0	0	33,75	24	2,632	2,316	0,481
7				0	0	0	0	0	18	36	11,25	2,452	0
7.5				0	0	0	0	0	6,75	22,5	7,5	1,372	0
8				0	0	0	0	0	1,5	15	12	3	0
8.5				0	0	0	0	0	0	7,5	6,75	5,25	0
9				0	0	0	0	0	0	0	13,5	0,75	1,5
9.5				0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0
10				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75
10.5				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energia totale(periodo)				0	52,36	291,354	650,49	722,499	483,187	200,822	64,106	23,832	4,427

Figura 6.3. Matrice dell'energia prodotta dal Pelamis in kWh

In un anno, sommando tutti i valori della matrice in fig.6.8, si ricava che un macchinario Pelamis può produrre circa 2.5 GWh. Di conseguenza le caratteristiche della wave farm sarebbero le seguenti:

Potenza nominale Pelamis	750 kW
Potenza installata wave farm	500 MW

Numero di dispositivi Pelamis	≈ 667
Energia prodotta annua	≈ 1668 GWh

Secondo il report [14] l'Irlanda nel 2020 avrà un fabbisogno di energia elettrica così distribuito:

Energia elettrica prodotta totale	≈ 27700 GWh	100 %
Quota prodotta da energie rinnovabili	≈ 7400 GWh	≈ 26.7 %
Quota prodotta da combustibili fossili	≈ 20300 GWh	≈ 73.3 %

Secondo i calcoli fatti, la quota parte del moto ondoso in Irlanda sulle risorse rinnovabili, adempiendo all'obiettivo di avere installato 500MW di potenza ondosa nel 2020 sarà :

Percentuale rispetto alla produzione rinnovabile di energia elettrica	≈ 22.5 %
Percentuale rispetto alla produzione totale di energia elettrica	≈ 6 %

### 6.1.1 Capacity Factor dell'impianto

Il Capacity Factor è il rapporto tra l'energia prodotta in un intervallo di tempo e quella che avrebbe potuto essere prodotta se l'impianto avesse funzionato, nello stesso intervallo, alla potenza nominale. In altre parole, il Capacity factor mostra l'efficienza reale di un impianto, individuando le ore equivalenti (solitamente su base annuale) di funzionamento alla potenza nominale. In questo esempio di dimensionamento il capacity factor è così derivato:

Numero di ore totali annuali di moto ondoso nel sito	≈ 8748 h
Energia prodotta nominale annuale da una macchina Pelamis	≈ 6561 MWh
Energia prodotta reale annuale da una macchina Pelamis	≈ 2493 MWh
Capacity Factor	≈ 38 %
Numero di ore equivalenti di una macchina Pelamis	≈ 3324 h

Il valore di Capacity Factor individuato si attesta nel range fornito dalla società Pelamis wave power che va dal 25 al 40%.

### 6.1.2 Impianto a moto ondoso in Italia

Nonostante il Mar Mediterraneo sia un mare a minore contenuto energetico, le possibilità di sfruttare questa risorsa rimangono comunque elevate. Tecnicamente si deve ancora fare molta ricerca poiché, come detto più volte, le caratteristiche delle onde in questo mare sono diverse da quelle oceaniche e possono essere sfruttate per la produzione di energia elettrica solo attraverso un convertitore appositamente progettato. Il Pelamis quindi risulterebbe inadeguato anche nel caso venisse posizionato nell'area a più alta densità energetica del Mediterraneo. Se si prende d'esempio il dispositivo R115 della 40SouthEnergy, in prova al largo delle coste italiane in collaborazione con Enel Green Power, si può ricavare che:

Energia elettrica prodotta annualmente da un macchinario R115	220 MWh
Potenza nominale dell'R115	100 kW
Numero di ore equivalenti di funzionamento	≈ 1467 h

Questo risultato di ore equivalenti attesta la risorsa di moto ondoso al pari del fotovoltaico e dell'eolico che, secondo il rapporto del GSE sulle statistiche delle rinnovabili del 2011, hanno un numero equivalente di ore di funzionamento pari a circa 1300 h e 1500 h rispettivamente.

## 6.2 Dati energetici del Mediterraneo:

Nel caso di mari più calmi e semichiusi come il Mar Mediterraneo, dove sono disponibili quantità di energia inferiori rispetto all'oceano, molte difficoltà tecniche legate alle condizioni estreme degli oceani possono essere facilmente risolte, rendendo probabilmente la produzione di energia elettrica da moto ondoso ancora economicamente conveniente. Da questo punto di vista, la produzione di energia ondosa nel Mediterraneo è particolarmente attraente per Paesi come l'Italia che hanno una linea costiera relativamente lunga[1]. In questo capitolo si analizza la situazione energetica ondosa del Mar Mediterraneo. Al momento, una stima accurata e dettagliata dell'energia ondosa dei mari italiani non è ancora disponibile. Gli atlanti dell'energia ondosa si basano su misurazioni ottenute da boe, dal satellite e dai risultati dei modelli. In anni recenti, diversi autori hanno presentato atlanti globali di energia ondosa. Questi lavori non includono i risultati per il Mediterraneo; oppure si basano su



modelli, con una risoluzione spaziale troppo grossolana, per poter distinguere, su una scala più piccola, le variazioni spaziali della disponibilità dell'energia ondosa, che sono importanti per identificare i siti adatti per la produzione di energia elettrica in bacini relativamente piccoli come quello del Mediterraneo. Sono stati sviluppati di recente, degli atlanti dell'energia ondosa delle coste italiane, usando dei parametri ondosi misurati da delle boe posizionate al largo della costa. Le boe per le onde forniscono le misure più accurate e dirette dei parametri ondosi. Comunque, le serie temporali ottenute dalle boe descrivono climi ondosi solo localmente, e presentano spesso dei grandi buchi di dati causati da guasti temporanei della boa, o da operazioni di manutenzione di routine. L'altezza delle onde e il periodo, non mostrano in genere gradienti spaziali elevati nell'oceano aperto, ma si osservano variazioni sostanziali spaziali in mari chiusi, dove gli ostacoli del terreno influenzano fortemente la generazione delle onde e la propagazione. In queste regioni i modelli delle onde rappresentano uno strumento importante per stimare la distribuzione dell'energia ondosa. In [2] viene descritto un atlante energetico delle onde del Mar Mediterraneo ottenuto per il periodo consecutivo di dieci anni dal 2001 al 2010 del modello ondoso ad 1/16 di risoluzione forzato dai campi eolici forniti dal ECMWF. Come è possibile vedere nella seguente mappa, Fig.6.1:

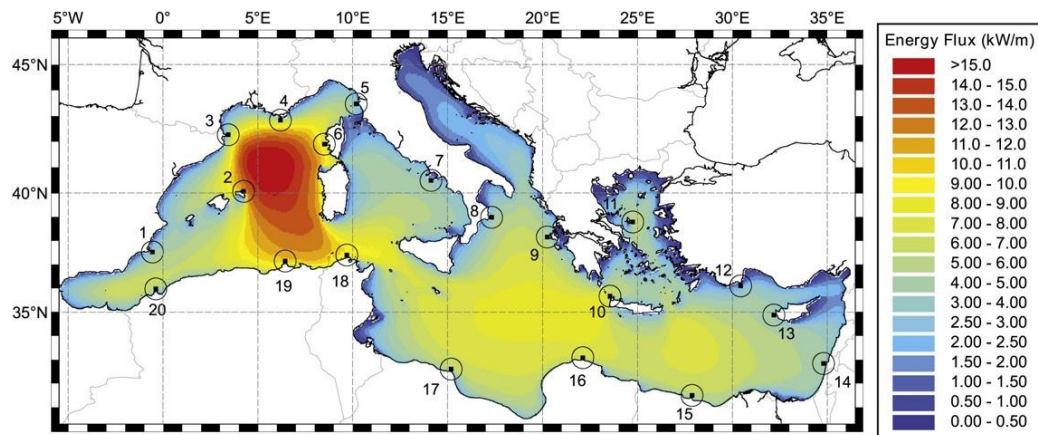


Figura 6.4 Distribuzione della potenza media per unità di lunghezza della cresta dell'onda nel Mediterraneo tra il 2001 e il 2010[3].

### 6.3 Distribuzione della potenza ondosa nel Mediterraneo

Dalla Fig.6.4 si evince che l'area più produttiva, con valori medi sopra i 12 kW/m, è situata nel Mediterraneo occidentale, tra le isole baleari e la costa occidentale della Sardegna. La potenza ondosa in quest'area, è più facilmente accessibile dalle coste della Sardegna, dalle isole baleari e dal nord Africa. La regione vicina situata nel canale di Sicilia, al largo delle coste siciliane nord

occidentali e meridionali, è anch'essa molto produttiva, con un flusso medio di energia ondosa per unità di lunghezza della cresta che raggiunge i 9 kW/m. Una potenza ondosa leggermente minore sembra essere disponibile nel Mediterraneo centrale e nel Mar Ionio meridionale, con valori medi che non superano gli 8 kW/m vicino alla costa nella parte orientale. La parte occidentale del bacino orientale, mostra valori simili che raggiungono quasi 8 kW/m. Il Mar Adriatico, dove la potenza media non supera i 3 kW/m, è una delle regioni meno produttive. Valori simili si trovano nelle parti più protette dello Ionio e del Tirreno, tra il continente e la Corsica e vicino allo Stretto di Messina[4].

#### 6.4 Distribuzione della potenza ondosa lungo le coste italiane

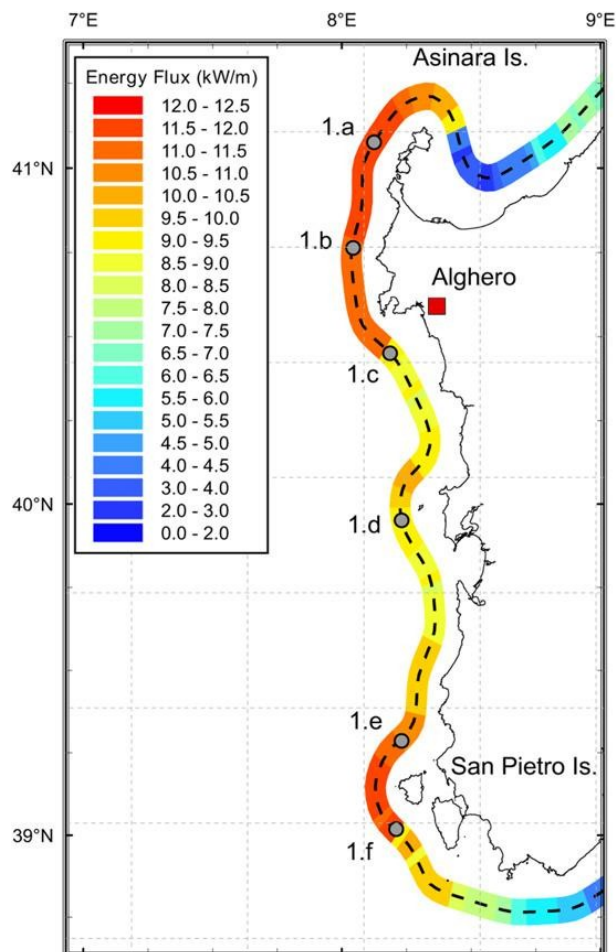


Figura 6.5 Distribuzione del flusso di potenza ondosa medio per unità di cresta nella costa occidentale sarda.

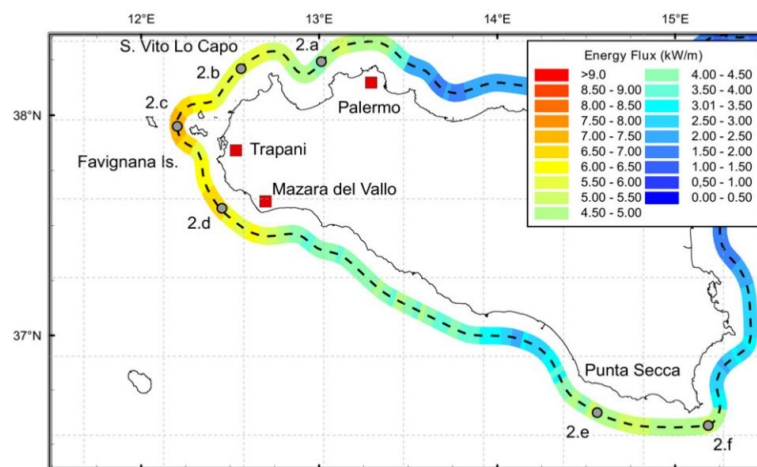


Figura 6.6 Distribuzione del flusso di potenza ondosa medio per unità di cresta lungo la costa siciliana

Una visione d'insieme più dettagliata, della distribuzione della potenza ondosa, in siti sufficientemente vicini alle aree più produttive della costa italiana, Sardegna occidentale, Sicilia occidentale e meridionale, è presentata nella figura 6.5 e 6.6, dove la potenza ondosa media, per unità di cresta, per l'intero periodo considerato, è calcolata lungo una linea posta approssimativamente a 12 km dalla costa. La distanza di 12km è stata scelta perchè corrisponde alle posizioni sufficientemente vicine alla costa, a rappresentare il clima ondoso giusto prima che la topografia del fondale cominci a modificare il campo ondoso. L'energia ondosa in aree più basse, più vicine alla costa, tende ad essere interessata dall'influenza della batimetria sulla propagazione delle onde, che non viene tenuta in conto dalla risoluzione spaziale del modello. Lungo la Sardegna occidentale la potenza media varia da 7.5 fino a quasi 12 kW/m. I valori più alti sono osservati nella parte settentrionale e meridionale della costa, tra Alghero e l'isola Asinara e vicino all'isola di San Pietro; lungo la parte intermedia della costa, si trovano valori più bassi tra 8.5 e 10 kW/m. La costa nordoccidentale e quella meridionale della Sicilia hanno un potenziale più basso, con una potenza ondosa media che varia tra 2.5 e 6.5 kW/m. Sulla costa settentrionale a ovest di Palermo, il flusso di potenza medio è tra 4 e 5 kW/m, che aumenta gradualmente, fino a valori tra i 5 e 6 kW/m, tra San Vito Lo Capo e Trapani. L'area più produttiva è situata lungo il tratto che giace a nord di Mazara del Vallo, dove la potenza media è oltre 6 kW/m, raggiungendo valori attorno a 7 kW/m vicino all'isola di Favignana. Le figure 6.5 e 6.6 mostrano che la potenza media ondosa ha una variabilità spaziale non trascurabile anche su distanze dell'ordine di 20km. Questa variabilità spaziale, non può essere adeguatamente descritta da misurazioni locali delle boe, o da modelli con una risoluzione spaziale più bassa. La potenza media è un parametro utile ad identificare delle aree promettenti per la produzione di energia ondosa, il suo valore comunque si

presenta come contributo degli stati individuali del mare, distribuiti su una gamma di altezze d'onda, periodi e direzioni. La potenza degli stati del mare più energetici e meno frequenti, può essere facilmente di un ordine di grandezza più grande dei valori osservati in condizioni normali. Da un punto di vista ingegneristico, dato che i WEC operano effettivamente su gamme specifiche di altezza delle onde e di periodi, lo studio di fattibilità per la produzione di energia ondosa dovrebbe essere portato avanti, considerando gli stati del mare più rappresentativi, in termini di produzione di energia. La potenza ondosa associata agli stati meno frequenti e più energetici, non può essere presa in considerazione, poichè il suo sfruttamento richiede infrastrutture sovradimensionate, e l'uso di WEC che probabilmente non sono capaci di operare bene in stati del mare meno energetici. Condizioni del mare con altezze d'onda significative tra 2 e 4 metri, e periodi significativi tra 8 e 10 secondi trasportano una quantità considerevole di energia totale, entrambi circa il 40%[5].

## **6.5 Variabilità della potenza ondosa**

Si osservi, che anche la distribuzione temporale dell'energia ondosa, gioca un ruolo importante per la scelta del sito. Nel Mediterraneo, la distribuzione stagionale degli stati del mare, segue uno schema in cui la stagione invernale e autunnale, sono le più energiche, mentre nel resto dell'anno, si hanno stati del mare più calmi. La variabilità stagionale del flusso di potenza ondosa calcolata, segue un andamento simile. La Fig. 6.4 mostra la distribuzione spaziale del flusso di potenza medio stagionale nel Mediterraneo, per l'intero periodo di simulazione.

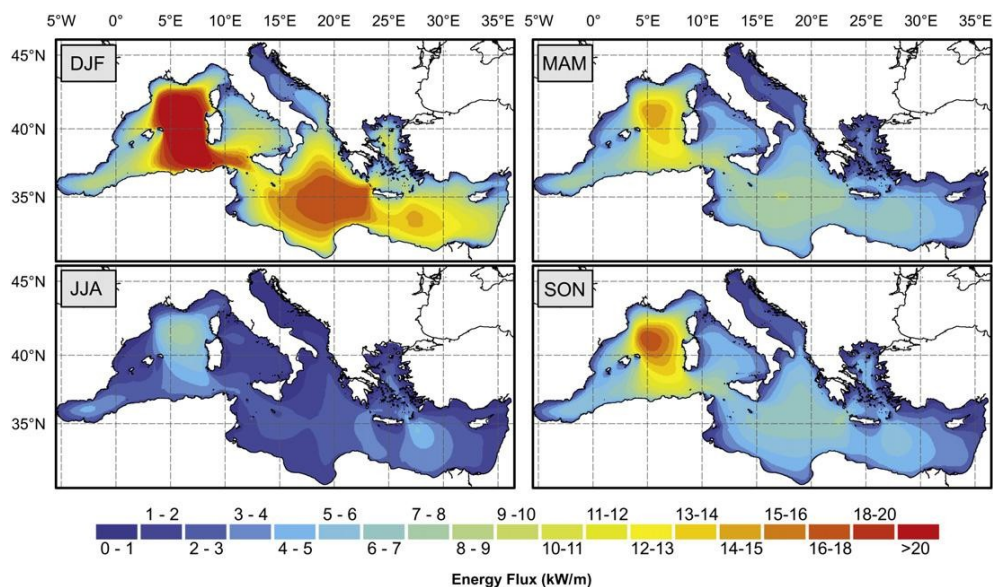


Figura 6.7. Distribuzione stagionale della potenza media per unità di cresta nel Mediterraneo. Le medie sono calcolate per l'intera simulazione di dieci anni. DJF sta per Dicembre, Gennaio, Febbraio; MAM per Marzo, Aprile, Maggio; JJA per Giugno, Luglio, Agosto; SON Settembre, Ottobre, Novembre.

Come previsto, i mesi invernali di Dicembre, Gennaio e febbraio sono i più produttivi, seguiti da quelli autunnali. La distribuzione spaziale della potenza ondosa segue circa lo schema descritto per la media annuale. Si possono trovare delle differenze nel Mediterraneo centrale, che sembra essere specialmente energetico durante la stagione invernale, e calmo durante l'estate. La potenza media stagionale mostra una gamma importante di variazione. Nel Mediterraneo occidentale, il flusso medio di potenza è sopra i 20 kW/m nelle grandi aree durante la stagione invernale, ma non supera 9 kW/m durante i mesi estivi. La variazione stagionale è più grande, in termini relativi, nelle regioni leggermente meno produttive del Mediterraneo orientale e centrale. Mentre la redditività complessiva di un certo sito può essere valutata in termini di produzione media di energia, prendendo in considerazione la sua distribuzione con l'altezza dell'onda, periodi e direzioni, le fluttuazioni intraannuali definiscono invece la variabilità delle entrate annuali attese. Per stimare la grandezza della fluttuazione intraannuale prendiamo in considerazione il Coefficiente di Variazione (COV), proposto come misura di variabilità temporale della potenza ondosa. Il COV è definito come:

$$\text{COV} = \sigma / \mu$$

Dove  $\sigma$  e  $\mu$  sono definiti rispettivamente la media e la deviazione standard del flusso di potenza ondosa medio annuale. Il COV misura la variabilità delle

osservazioni rispetto al loro valore medio. Il COV di serie costanti di valori è 0 mentre un COV pari a 1 significa che la deviazione standard eguaglia il valore medio. La Fig.6.8 mostra la distribuzione spaziale del COV attorno alla penisola italiana.

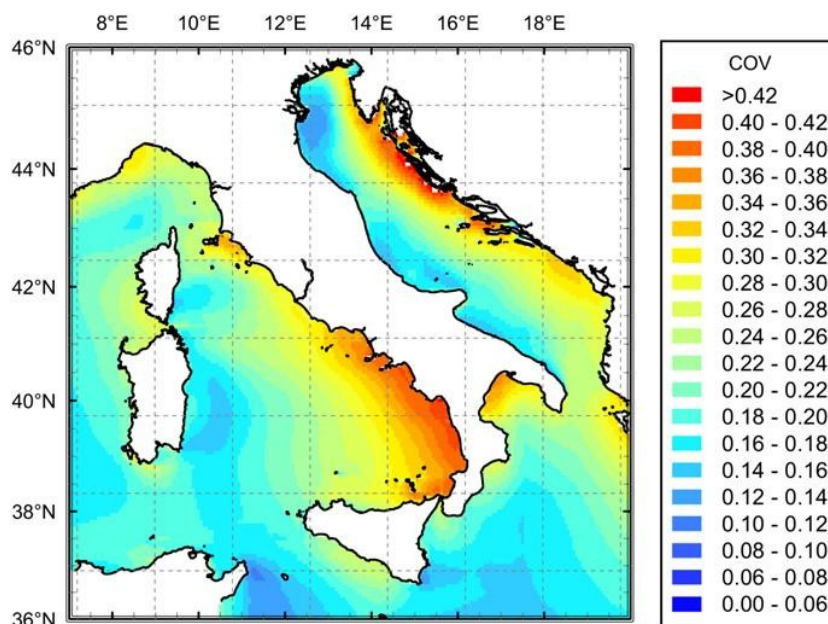


Figura 6.8 Distribuzione del Coefficiente di Variazione (COV) dei flussi di potenza media annuale, per gli anni 2001 e 2010 attorno all'Italia. La griglia di linee tratteggiate sono separate 200km.

Fluttuazioni medie annuali del flusso di potenza ondosa sopra il 20% della media complessiva, che corrisponde a  $COV > 0.2$ , si osservano normalmente attorno alla penisola italiana. Sembra che la gamma di fluttuazioni sia più grande nelle aree riparate. I valori maggiori di COV si osservano nel Tirreno meridionale dove supera 0.4, in parti dello Ionio, e nelle regioni tra la penisola e la Corsica dove raggiunge valori superiori a 0.3. Lungo la costa occidentale della Sardegna e lungo la costa nordoccidentale e meridionale della Sicilia le fluttuazioni intraannuali sono più deboli con  $COV < 0.25$ . Questi risultati confermano che la Sardegna occidentale e la Sicilia meridionale e occidentale, sono le aree più promettenti, lungo la costa italiana, per la produzione di energia ondosa, anche in termini di variabilità intra-annuale[6].

## 6.6 Normativa e Incentivi in Italia

Attualmente le modalità di incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti a moto ondoso, collegati alla rete elettrica, sono stabilite dal DM 6



luglio 2012. Il DM 6 luglio 2012 disciplina, infatti, le modalità di incentivazione dell'energia elettrica prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, diverse da quella solare fotovoltaica, con potenza non inferiore a 1 kW. Gli incentivi si applicano agli impianti nuovi, integralmente ricostruiti, riattivati, oggetto di intervento di potenziamento o di rifacimento che entrano in esercizio a partire dal 1° gennaio 2013. Gli incentivi sono riconosciuti sulla produzione di energia elettrica netta immessa in rete dall'impianto. L'energia elettrica autoconsumata non ha accesso agli incentivi. In base alla potenza dell'impianto sono previsti due distinti meccanismi incentivanti:

- una tariffa incentivante onnicomprensiva ( $T_o$ ) per gli impianti di potenza fino a 1 MW, determinata dalla somma tra una tariffa incentivante base, il cui valore è individuato per ciascuna fonte, tipologia di impianto e classe di potenza nell'Allegato 1 del Decreto, e l'ammontare di eventuali premi (es. riduzione emissioni). L'energia immessa in rete dagli impianti che accedono alla tariffa onnicomprensiva risulta nella disponibilità del GSE e non del produttore.
- un incentivo ( $I$ ) per gli impianti di potenza superiore a 1 MW e per quelli di potenza fino a 1 MW che non optano per la tariffa onnicomprensiva, calcolato come differenza tra la tariffa incentivante base, a cui vanno sommati eventuali premi a cui ha diritto l'impianto, e il prezzo zonale orario dell'energia (riferito alla zona in cui è immessa in rete l'energia elettrica prodotta dall'impianto). L'energia prodotta dagli impianti che accedono all'incentivo ( $I$ ) resta nella disponibilità del produttore. Il Decreto stabilisce che il costo indicativo cumulato di tutte le tipologie di incentivo riconosciute agli impianti a fonte rinnovabile, diversi dai fotovoltaici, non può superare complessivamente il valore di 5,8 miliardi di euro annui[7]. Nell'articolo 9 del decreto vengono indicate le potenze prodotte da fonti rinnovabili messe a registro. Si noti che nel 2013 verranno installati 3 MW di potenza da energia marina[8]. L'allegato 1 del decreto indica l'ammontare delle tariffe onnicomprensive delle singole fonti di energia rinnovabile. Nella tabella 6.2 si indicano gli incentivi per la fonte di energia oceanica[10].

Tabella 6.2. Vita utile convenzionale, tariffe incentivanti e incentivi per i nuovi impianti

Fonte rinnovabile	Potenza	Vita utile degli impianti	Tariffa incentivante base
	kW	anni	€/MWh
Oceanica (comprese maree e moto ondoso)	$1 < P \leq 5000$	15	300
	$P > 5000$	20	194

L'ammontare della tariffa omnicomprensiva è pari a 300 € /MWh per un impianto di potenza inferiore ad 1MW[11].



## Capitolo 7

### Impatto ambientale

I convertitori a moto ondoso non producono alcun tipo di emissione inquinante durante il funzionamento. Tuttavia, come tutte le altre energie rinnovabili, l'energia ondosa non ha un impatto nullo sull'ambiente. Si sono osservate delle differenze sostanziali tra l'impatto generato dai dispositivi installati onshore e quelli offshore[1]. L'impatto degli impianti onshore viene trattato in un paragrafo a fine capitolo. Si presentano qui di seguito le diverse tematiche legate all'impatto ambientale dei dispositivi offshore:

#### 7.1 Impatto sul sistema abiotico e i processi costieri

In seguito all'impatto con un convertitore a moto ondoso, si ha una riduzione dell'altezza delle onde dell'ordine del 10-15%. La diffrazione ristabilisce poi uniformità nell'altezza delle onde entro 3-4 km dall'impianto. C'è anche una preoccupazione che i dispositivi offshore possano alterare le correnti marine. La diminuzione dei livelli energetici delle onde che raggiungono la costa, potrebbe ridurre il trasporto di sedimenti sul litorale, probabilmente riducendo l'erosione nella vicinanza dell'impianto, mentre aumenterebbe l'erosione più giù lungo la costa. Questo impatto comunque, è probabile che sia significativo solo per dispositivi posizionati entro 1 o 2 km dalla costa. Se il parco a moto ondoso occupa un'area considerevole, potrebbe leggermente cambiare le abitudini delle onde e produrre piccole modifiche nella linea costiera. Si noti che, in certi casi, questo effetto può essere positivo. La frazione di sedimenti può anche cambiare leggermente nelle vicinanze dell'area, dove i cavi e gli ormeggi vengono installati. Ma si pensa, che l'impatto sull'idrografia e sul trasporto di sedimenti, per l'installazione di una centrale elettrica a moto ondoso, siano trascurabili[2].

#### 7.2 Qualità dell'aria

Alcuni dispositivi possono essere rumorosi, e il rumore generato dipende dal clima ondoso. Tuttavia, si pensa che essi non siano più rumorosi dei suoni circostanti generati dal vento e dalle onde, che forniscono un isolamento acustico. La costruzione, l'operazione e il decommissionamento di grandi strutture meccaniche produrrà inevitabilmente dei suoni che potrebbero disturbare o addirittura causare danni fisici agli animali selvatici nelle vicinanze. Per certi dispositivi il rumore può essere di disturbo anche per le comunità

locali. La fase di costruzione può dare disturbo se è richiesto l'utilizzo del battipalo. La ricerca fino ad ora ha dimostrato che il tempo di sollevamento e di decadimento del battipalo è molto importante, e che una combinazione di un'innalzamento e discesa rapidi ( $\sim 1$  ms) con una pressione sonora di  $\sim 229$  dB con riferimento a  $1 \mu\text{Pa}$  sono sufficienti per essere letali, ed è quindi improbabile che le operazioni di palificazione causino mortalità direttamente[3].

### **7.2.1 Disturbo del rumore sui mammiferi marini**

Gli effetti fisici e fisiologici potrebbero includere variazioni sulla soglia d'udito e danni uditivi. Le reazioni comportamentali, incluso lo spavento, l'allontanamento e i cambiamenti nel comportamento e nella configurazione della vocalizzazione sono stati osservati nei fanoni, odontoceti e pinnipedi; in certi casi a distanza di decine o centinaia di chilometri da rumori industriali forti. Ci sono ancora importanti lacune nella nostra conoscenza. Per esempio, le caratteristiche del suono di queste nuove tecnologie in sviluppo sono scarsamente conosciute e come si propagano a diverse distanze e profondità è poco compreso. E' necessario quindi lavorare per stimare i livelli di sicurezza di esposizione per le diverse specie di mammiferi marini[4].

### **7.2.2 Disturbo del rumore sui pesci**

Anche se i danni fisiologici sono difficilmente causati dalla costruzione di dispositivi a moto ondoso, il comportamento può esserene disturbato. Molte specie di pesci usano il suono sia per la comunicazione sia per trovare prede e predatori. Comunque, potrebbe esserci un danno fisiologico temporaneo o permanente che potrebbe compromettere la sopravvivenza[5].

## **7.3 Qualità dell'acqua**

Quando si parla degli effetti chimici dei dispositivi a moto ondoso, è importante distinguere tra le fuoriuscite di sostanze chimiche, a bassa probabilità ma ad alto impatto, e i rilasci continui di sostanze chimiche, come per esempio le vernici che inquinano[6]. L'impatto ambientale della fase di costruzione di un impianto a moto ondoso, può generare una torbidità crescente dell'acqua. Le emissioni delle installazioni, potrebbero verificarsi come risultato di una cattiva pratica o di incidenti. Certi dispositivi contengono delle quantità di olio per il funzionamento dei loro sistemi idraulici. Questo potrebbe portare a perdite di olio, se i circuiti idraulici vengono rotti da incidenti di collisione con le navi, o durante operazioni di manutenzione[7]. La rapida e forte crescita del fouling marino dei dispositivi a moto ondoso, è considerata con particolare preoccupazione. Ci sono ora solo tre possibilità per trattare il fouling marino:

l'utilizzo di un rivestimento antifouling (antivegetativo), pulizia sul posto utilizzando jet spray ad alta pressione da parte di sommozzatori o di veicoli guidati in remoto, e la rimozione del dispositivo dalla superficie dell'acqua per la pulizia nel sito o sulla costa, e la riapplicazione del rivestimento antifouling. Da diversi anni viene gradualmente escluso l'utilizzo di composti di tributile di stagno sui rivestimenti, e la ricerca si è spinta verso lo sviluppo di rivestimenti antivegetativi meno tossici. I composti chimici si possono diffondere in un'area molto vasta, a seconda dello schema di circolazione dell'acqua[8].

#### **7.4 Impatto sul sistema biotico**

Durante l'installazione e il decommissionamento dei dispositivi a moto ondoso, si ha un turbamento diretto provocato dall'ancoraggio delle imbarcazioni di costruzione, o scavando e riempiendo i canali dei cavi elettrici, e anche a causa dell'installazione degli ancoraggi permanenti, della palificazione o di altri sistemi di ormeggio. Quando l'installazione è completata, le aree coinvolte dovrebbero essere ricolonizzate dagli stessi organismi preesistenti, dando per scontato che il substrato e il loro habitat vengano restaurati ad uno stato simile a quello antecedente; ma le incertezze dovute alle conseguenze indirette dell'alterazione della circolazione dell'acqua, potrebbero essere più ampie e più durature[9]. Lo sfruttamento dell'energia ondosa, può impattare anche sulle comunità biologiche vicine alla costa, con la probabilità di disturbare il bilancio biologico, quando questo interferisce con i processi di sedimentazione e con la mescolanza di specie microscopiche. La torbidità generata nella fase di costruzione, come detto prima, potrebbe temporaneamente riguardare i produttori primari. Questo impatto diretto sulla risorsa bentica della battigia, rappresenta la perdita di una quota di una parte della risorsa potenziale di cibo per i pesci. L'effetto non influenza l'efficienza di alimentazione o le popolazioni di pesci, e conseguentemente non è previsto alcun impatto significativo sui pesci. In aggiunta, possono essere provocate delle perdite temporali dell'habitat di comunità bentiche del litorale e della battigia, come risultato dell'installazione di cavi sommersi, che avrebbero un impatto sul corridoio, nonostante dovrebbe essere rapidamente colonizzato una volta che l'installazione nell'area venisse completata. L'installazione del dispositivo impatterebbe anche sulla flora e sulla fauna bentica locale, e il disturbo di questa comunità potrebbe riguardare gli ecosistemi locali. Questo dipende dal tipo di dispositivo (sommerso avrebbe un maggiore impatto), o dal tipo di ormeggio e di ancore usate, ma questi effetti sono a breve termine, purchè vengano evitate aree ecologicamente sensibili. D'altro canto, un effetto positivo è che la presenza di impianti a moto ondoso ridurrà la pesca nell'area, il che è una domanda crescente di molti conservatori, dato che la maggior parte dei mari vengono eccessivamente sfruttati. Esso creerebbe i rifugi per i pesci, aumentando la produttività del mare. Infatti, gli

habitat introdotti dalle wave farm, se sono progettate adeguatamente, saranno adatti per la colonizzazione di diversi animali marini e di alghe, e il substrato del fondo duro potrebbe agire, sia individualmente sia collettivamente, come una barriera corallina artificiale, e da aree di riposo per specie in pericolo o vulnerabili[10].

#### **7.4.1 Effetti della barriera corallina artificiale**

La rapida ed estesa colonizzazione delle strutture per l'energia ondosa, da parte delle comunità macro-bentiche, è maggiore sulle fondamenta dei dispositivi installati in zone costiere sabbiose. È importante determinare se questo cambiamento sia vantaggioso o meno per le condizioni locali esistenti. Le unità di energia offshore dovrebbero essere considerate come barriere coralline artificiali, e come tali il loro design può assumere un ruolo fondamentale nella colonizzazione delle diverse specie[11]. In aggiunta, l'introduzione di comunità adatte ai fondali sedimentari, aumenterà la disponibilità di cibo per i pesci, che di nuovo porterà ad un aumento nel cibo disponibile per i mammiferi marini e per gli uccelli. La previsione della vita di servizio dei materiali strutturali, è complicata dalla complessità delle interazioni dei materiali con i diversi ambienti marini. Il successo dipende da una varietà di fattori: l'orientamento del sito potrebbe essere importante, perché determina l'esposizione alle correnti prevalenti; e certi siti possono avere più introduzioni di cibo particolato, scambio di ossigeno maggiore, e maggiore fornitura di larve. D'altro canto, il decommissionamento di un impianto dovrebbe essere studiato con attenzione, perché potrebbe interessare, oltre gli organismi residenti della barriera corallina artificiale creata, anche altre comunità, che sono ecologicamente interconnesse[12].

#### **7.4.2 Campo elettromagnetico**

I cavi sottomarini connettono tra di loro i dispositivi, e se possibile si connettono anche con un hub comune, a seconda del progetto del parco. Perciò una porzione importante del fondale marino nei parchi offshore è interessata dalla presenza di cavi. Il campo elettromagnetico è un termine ampio, che include il campo elettrico, misurato in  $\mu\text{V}/\text{m}$ , che è solitamente contenuto all'interno dell'isolamento del cavo magnetico, misurato in  $\mu\text{Tesla}$ , che è percettibile all'esterno del cavo. A sua volta, il campo magnetico può creare un campo elettrico indotto, quando degli animali conduttori ci si muovono attraverso. Certe specie marine hanno l'abilità di percepire, e alcune di usare, i campi elettromagnetici per l'orientamento e la percezione di altri animali. Il report COWRIE 1.5 conclude che un'interazione tra le specie elettrosensibili e i campi elettromagnetici causati dai cavi per l'eolico offshore è probabile che si

verificati[13]. I campi magnetici artificiali ed elettrici, associati ai cavi elettrici sottomarini, possono causare interferenze e disturbi nell'orientamento degli animali migranti, e con i meccanismi di alimentazione degli elasmobranchii. I campi elettromagnetici artificiali dei cavi elettrici sottomarini, possono interferire con la percezione delle prede o con le abilità di navigazione (di pesci elettrosensibili come gli squali e le razze), nell'immediata vicinanza dei cavi marini. In questa fase di sviluppo, i cavi di trasmissione utilizzati, sono quelli per i sistemi a corrente alternata. I quali non comportano una deviazione misurabile dei compassi o un disturbo della radio o dei GPS delle navi che passano sopra i cavi. Tuttavia è molto difficile, con i dati attuali, stimare se può esserci un impatto sulle specie o un impatto ecologico causato dai campi elettromagnetici[14].

## **7.5 Mammiferi marini**

I rumori sottomarini (rumori e vibrazioni), potrebbero disturbare certi mammiferi marini e i pesci, a seconda del loro campo di frequenza, nei quali possono produrre perfino lesioni temporali o permanenti. I mammiferi marini sono capaci di rilevare il suono a bassa frequenza generato dalle turbine eoliche offshore, tanto da poter ascoltare anche i dispositivi a moto ondoso. Essi possono reagire per attrazione, spostamento o cambiamento comportamentale a breve termine, e possono variare le vie migratorie di specie con un valore commerciale. Il suono può mascherare dei suoni naturali importanti, produrre stress o causare perdite uditive. E' necessario considerare separatamente l'impatto dei rumori dovuti alla costruzione e quelli dovuti al funzionamento, includendo quelli che derivano dall'attività di manutenzione, e deve essere svolto un maggior lavoro per conoscere i possibili effetti del rumore sugli individui e sulle popolazioni. Ci si aspetta che queste emissioni siano basse e che i mammiferi ci si possano adattare. Un altro motivo di preoccupazione è che potrebbe esserci un rischio di collisione dei mammiferi marini con i dispositivi. Per esempio, gli scontri di mammiferi da parte dei traghetti ad alta velocità, sono un problema più grande di quanto si pensi, e ci sono molte informazioni disponibili a riguardo. Rispetto a ciò, vengono fatte diverse investigazioni sulle tecniche per avvertire i mammiferi della presenza di strutture fatte dall'uomo. Inoltre, i dispositivi che si allungano sopra al livello del mare, come le boe di spostamento, sono adatti ad attrarre i pinnipedi durante i periodi di calma delle onde. Assumendo che il dispositivo abbia una piattaforma adatta, questo fenomeno risulterebbe in una crescita delle popolazioni di queste specie maggiore di quella che altrimenti si verificherebbe in assenza del progetto. Il cambiamento climatico potrebbe avere un'influenza imprevedibile sull'impatto ambientale dei dispositivi a moto ondoso. Le rotte utilizzate dai pesci migranti e dai mammiferi marini, possono essere irregolari e imprevedibili, e

probabilmente dipendono dalle stagioni, dal clima regionale e locale e dall'accesso alle risorse di cibo[15].

## **7.6 Uccelli**



Gli impianti potrebbero fornire uno spazio di nidificazione artificiale per gli uccelli marini, e risulterebbe nella crescita delle popolazioni di queste specie, maggiore di quella che si avrebbe senza il progetto. In aggiunta, la probabilità che questo accada è aumentata perchè le boe richiedono solo visite di servizio sporadiche. D'altro canto, molte specie di uccelli marini sono attratte dalle fonti di luce artificiale. Sono state documentate grandi fenomeni di attrazione e di mortalità degli uccelli a causa dei fari, delle luci di navigazione, delle piattaforme petrolifere offshore, ecc., la maggior parte durante notti nuvolose con nebbia e pioggia fine. Oltretutto, la maggior parte degli uccelli che migrano di notte, salgono alla loro altitudine di migrazione subito dopo il decollo, e cominciano una graduale discesa poco dopo la mezzanotte. Perciò, c'è una bassa probabilità di una collisione degli uccelli con i dispositivi[16]. Tabella 7.1 Tabella degli effetti delle diverse fasi di impiego sui diversi fattori ambientali[17]

## **7.7 Dispositivi onshore**

L'impatto a breve termine di un'installazione di dispositivi onshore, dovrebbe avere un impatto maggiore di quelli impiegati offshore, fintanto che questi dispositivi onshore richiedono scavi sulla costa. Una turbina Wells in un dispositivo onshore o nearshore a colonna d'acqua oscillante, può emettere livelli eccessivi di rumore. Per il momento, questo è conosciuto come il dispositivo più rumoroso. Essi possono anche generare rumore e vibrazioni nell'acqua, in grado di disturbare i pesci con capacità auditive. Gli OWC sono adatti ad attrarre uccelli marini, che perderebbero il loro habitat di riposo dopo lo smantellamento del dispositivo. Se vengono installati sulla costa, senza essere ben mimetizzati, possono avere un impatto visivo. Particolari impatti positivi per questo tipo di tecnologia, che vale la pena menzionare sono, la creazione di nuove infrastrutture che permettano il loro accesso, quali le strade, e perciò anche l'aumento del turismo. Se installato su un'isola, esso riduce la dipendenza energetica dall'esterno. In aggiunta, nel ridurre il trasporto di petrolio o dei suoi derivati, esso riduce il rischio ambientale associato a loro.



## Conclusione

Si è analizzato lo stato dell'arte della tecnologia per lo sfruttamento del moto ondoso al fine della produzione di energia elettrica. Le tipologie di convertitori in sviluppo in tutto il mondo sono numerose, e nessuna di queste si è ancora imposta come tecnologia vincente, esistono tuttavia alcuni prototipi in fase pre-commerciale, che verranno impiegati per le prime centrali a moto ondoso nel futuro prossimo. In Europa si è avuto il maggior fermento nella ricerca, che si è tradotta nella progettazione di siti di prova all'avanguardia per la tecnologia offshore del moto ondoso. Uno dei mari a maggior contenuto energetico si trova infatti al largo delle coste irlandesi e inglesi, i quali stati hanno deciso di investire molte risorse in questo tipo di energia marina. Vere e proprie wave farm (centrali elettriche a moto ondoso composte da più dispositivi) non sono state ancora realizzate, ma sono stati costruiti a livello commerciale degli impianti onshore a colonna d'acqua oscillante, che è la tecnologia più semplice e più fattibile, soprattutto se viene incorporata nelle strutture frangiflutti dei porti. E' necessario aspettare ancora qualche anno per vedere realizzate delle wave farm multidispositivo offshore, ma molti progetti sono già stati avviati in questo senso. Il Mar Mediterraneo ha delle caratteristiche ondose completamente diverse dall'oceano, per questo motivo era necessario sviluppare delle tecnologie ad hoc, capaci di sfruttare la bassa densità energetica e le onde più irregolari di quelle oceaniche. Nonostante le difficoltà, sembra che anche le coste italiane possano offrire un campo di sviluppo economicamente fattibile per il moto ondoso. Probabilmente lo sfruttamento commerciale di questa risorsa avverrà dapprima nei contesti più favorevoli lungo le coste oceaniche europee e, in un secondo momento, quando l'esperienza e l'economia di scala miglioreranno la fattibilità economica, si verificherà un investimento anche nel Mediterraneo. Attraverso il dimensionamento di un'ipotetica wave farm in Irlanda, composta da soli WEC Pelamis, per raggiungere l'obiettivo di avere una capacità installata a moto ondoso di 500MW nel 2020, si è giunti alla conclusione che per una nazione così favorita, il moto ondoso si attesterà come fonte rinnovabile importante nel futuro prossimo, mentre il parallelismo fatto con la situazione italiana, spiega quanto anche nel Mediterraneo, questa fonte sia paragonabile, in termini di ore equivalenti di funzionamento, all'energia eolica e fotovoltaica. L'impatto ambientale, che comporterebbe lo sfruttamento delle onde del mare per la produzione di energia elettrica è un argomento molto vasto e molto delicato, e deve ancora essere studiato in profondità in quanto c'è il rischio che una tecnologia sostenibile in partenza, si riveli di disturbo per l'habitat marino.



# Bibliografia

## CAPITOLO 1

- [1] Review and analysis of ocean energy systems development and supporting policies . A report by AEA Energy & Environment on the behalf of Sustainable Energy Ireland for the IEA's implementing Agreement on Ocean Energy Systems. 28th June 2006
- [2] Ocean Wave Energy Conversion – A Survey . A. MUETZE, J. G. VINING . Electrical and Computer Engineering Department . University of Wisconsin-Madison, WI 53706, USA . 2006 IEEE
- [3] Generating electricity from the oceans . AbuBakr S. Bahaj. The University of Southampton, Sustainable Energy Research Group, Energy and Climate Change Division, School of Civil Engineering and the Environment, Southampton SO17 1 BJ, United Kingdom. 2011
- [4] Generating electricity from the oceans . AbuBakr S. Bahaj. The University of Southampton, Sustainable Energy Research Group, Energy and Climate Change Division, School of Civil Engineering and the Environment, Southampton SO17 1 BJ, United Kingdom. 2011
- [5] Generating electricity from the oceans . AbuBakr S. Bahaj. The University of Southampton, Sustainable Energy Research Group, Energy and Climate Change Division, School of Civil Engineering and the Environment, Southampton SO17 1 BJ, United Kingdom. 2011
- [6] Aquaret textbook. Wave, chapter 4. 2013
- [7] Report on technical specification of reference technologies (wave and tidal power plant). NEEDS  
New Energy Externalities Developments for Sustainability . Authors: Hans Chr. Sørensen, Stefan Naef . 2008
- [8] Report on technical specification of reference technologies (wave and tidal power plant). NEEDS  
New Energy Externalities Developments for Sustainability . Authors: Hans Chr. Sørensen, Stefan Naef . 2008
- [9] Report on technical specification of reference technologies (wave and tidal power plant). NEEDS  
New Energy Externalities Developments for Sustainability . Authors: Hans Chr. Sørensen, Stefan Naef . 2008
- [10] Report on technical specification of reference technologies (wave and tidal power plant). NEEDS  
New Energy Externalities Developments for Sustainability . Authors: Hans Chr. Sørensen, Stefan Naef . 2008
- [11] Aquaret textbook. Tidal stream, chapter 3. 2013
- [12] Aquaret textbook. Tidal stream, chapter 3. 2013

- [13] Aquaret textbook. Tidal impoundment, chapter 2. 2013
- [14] Electricity Generation by the Ocean Thermal Energy . Ahmad Etemadi, Arash Emdadi, Orang AsefAfshar, Yunus Emami. Urmia University of Technology, Urmia, Iran. 2011.
- [15] Review and analysis of ocean energy systems development and supporting policies . A report by AEA Energy & Environment on the behalf of Sustainable Energy Ireland for the IEA's implementing Agreement on Ocean Energy Systems. 28th June 2006
- [16] Estimates of global Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) resources using an ocean general circulation model . Krishnakumar Rajagopalan, Gérard C. Nihous. Department of Ocean and Resources Engineering, University of Hawaii, 2540 Dole Street, Holmes 402, Honolulu, HI 96822, USA . 2012.
- [17] Electricity Generation by the Ocean Thermal Energy . Ahmad Etemadi, Arash Emdadi, Orang AsefAfshar, Yunus Emami. Urmia University of Technology, Urmia, Iran. 2011.
- [18] The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis. Thor Thorsen, Torleif Holt. The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway. 2009
- [19] The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis. Thor Thorsen, Torleif Holt. The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway. 2009
- [20] Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis. Jan W. Post, Joost Veerman, Hubertus V.M. Hamelers, Gerrit J.W. Euverink, Sybrand J. Metz, Kitty Nymeijer, Cees J.N. Buisman. 2006.
- [21] Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis. Jan W. Post, Joost Veerman, Hubertus V.M. Hamelers, Gerrit J.W. Euverink, Sybrand J. Metz, Kitty Nymeijer, Cees J.N. Buisman. 2006.
- [22] The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis. Thor Thorsen, Torleif Holt. The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway. 2009

## **CAPITOLO 2**

- [1] Electrical systems for wave energy conversion. Cecilio Boström. Uppsala Universitet. 2011

- [2] Power Generation by Fluids . Lecture Practical Tutorial . Prof. Dr. Ashraf Said Ismail . 2012
- [3] Aquaret textbook. Wave, chapter 4. 2013
- [4] Generating electricity from the oceans . AbuBakr S. Bahaj. The University of Southampton, Sustainable Energy Research Group, Energy and Climate Change Division, School of Civil Engineering and the Environment, Southampton SO17 1 BJ, United Kingdom . 2011
- [5] Fundamentals of Ocean Wave Energy Conversion, Modeling, and Control. Ted Brekken. Oregon State University. 2010.
- [6] The Wave Energy Resource . Stephen Barstow, Gunnar Mørk , Denis Mollison, João Cruz. 2008
- [7] The Wave Energy Resource . Stephen Barstow, Gunnar Mørk , Denis Mollison, João Cruz. 2008
- [8] The Wave Energy Resource . Stephen Barstow, Gunnar Mørk , Denis Mollison, João Cruz. 2008
- [9] The Wave Energy Resource . Stephen Barstow, Gunnar Mørk , Denis Mollison, João Cruz. 2008
- [10] The Wave Energy Resource . Stephen Barstow, Gunnar Mørk , Denis Mollison, João Cruz. 2008
- [11] The Wave Energy Resource . Stephen Barstow, Gunnar Mørk , Denis Mollison, João Cruz. 2008
- [12] The Wave Energy Resource . Stephen Barstow, Gunnar Mørk , Denis Mollison, João Cruz. 2008

### **CAPITULO 3**

- [1] Power Generation by Fluids . Lecture Practical Tutorial . Prof. Dr. Ashraf Said Ismail . 2012
- [2] Power Generation by Fluids . Lecture Practical Tutorial . Prof. Dr. Ashraf Said Ismail . 2012
- [3] Power Generation by Fluids . Lecture Practical Tutorial . Prof. Dr. Ashraf Said Ismail . 2012
- [4] Wave energy utilization: A review of the technologies . Antonio F. de O. Falcao . Instituto Superior tecnico, Technical university of Lisbon. 2009
- [5] Power Generation by Fluids . Lecture Practical Tutorial . Prof. Dr. Ashraf Said Ismail . 2012
- [6] Wave energy utilization in Europe. European Thematic Network on Wave Energy , Produced by Centre for Renewable Energy Sources (CRES). 2002
- [7] Wave energy utilization in Europe. European Thematic Network on Wave Energy , Produced by Centre for Renewable Energy Sources (CRES). 2002

- [8] Model based design of efficient power take-off systems for wave energy converters. Rico H. Hansen, Torben O. Andersen, Henrik C. Pedersen. Aalborg University, Department of Energy Technology. 2011
- [9] Wave energy converter concepts. Balazs Czech, Pavol Bauer. 2012
- [10] Wave energy converter concepts. Balazs Czech, Pavol Bauer. 2012
- [11] Wave energy utilization: A review of the technologies . Antonio F. de O. Falcao . Instituto Superior tecnico, Technical university of Lisbon. 2009
- [12] Wave energy utilization: A review of the technologies . Antonio F. de O. Falcao . Instituto Superior tecnico, Technical university of Lisbon. 2009
- [13] Wave energy utilization: A review of the technologies . Antonio F. de O. Falcao . Instituto Superior tecnico, Technical university of Lisbon. 2009
- [14] Wave energy utilization: A review of the technologies . Antonio F. de O. Falcao . Instituto Superior tecnico, Technical university of Lisbon. 2009
- [15] State of the art analysis, A Cautiously Optimistic Review of the Technical Status of Wave Energy Technology . Waveplam, project funded under the Intelligent Energy Europe Programme. 2009.
- [16] Wave energy utilization: A review of the technologies . Antonio F. de O. Falcao . Instituto Superior tecnico, Technical university of Lisbon. 2009
- [17] Wave energy utilization: A review of the technologies . Antonio F. de O. Falcao . Instituto Superior tecnico, Technical university of Lisbon. 2009
- [18] Wave energy utilization: A review of the technologies . Antonio F. de O. Falcao . Instituto Superior tecnico, Technical university of Lisbon. 2009
- [19] Model based design of efficient power take-off systems for wave energy converters. Rico H. Hansen, Torben O. Andersen, Henrik C. Pedersen. Aalborg University, Department of Energy Technology. 2011
- [20] Model based design of efficient power take-off systems for wave energy converters. Rico H. Hansen, Torben O. Andersen, Henrik C. Pedersen. Aalborg University, Department of Energy Technology. 2011
- [21] Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status. M.S. Lagoun, A. Benalia, M.E.H Benbouzid. 2010
- [22] Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status. M.S. Lagoun, A. Benalia, M.E.H Benbouzid. 2010
- [23] Design and Testing of a Linear Generator for Wave-Energy Applications. Neil Hodgins, Ozan Keysan, Alasdair S. McDonald, Markus A. Mueller. 2012.
- [24] Design and Testing of a Linear Generator for Wave-Energy Applications. Neil Hodgins, Ozan Keysan, Alasdair S. McDonald, Markus A. Mueller. 2012.
- [25] Design and Testing of a Linear Generator for Wave-Energy Applications. Neil Hodgins, Ozan Keysan, Alasdair S. McDonald, Markus A. Mueller. 2012.

- [26] Design and Testing of a Linear Generator for Wave-Energy Applications. Neil Hodgins, Ozan Keysan, Alasdair S. McDonald, Markus A. Mueller. 2012.
- [27] A method for EIA scoping of wave energy converters based on classification of the used technology . Lucia Margheritini, Anne Merrild Hansen, Peter Frigaard. 2011.
- [28] Wave energy converter concepts. Balazs Czech, Pavol Bauer. 2012
- [29] Is it a showstopper? Reliability assessment and criticality analysis for Wave Energy Converters. P. R. Thies, J. Flinn, G. H. Smith. 2009.
- [30] Review of wave energy resource and oscillating water column modelling. D. G Dorrell, J. R. Halliday, P. Millcr, M. Findlater . 2004.
- [31] Review of wave energy resource and oscillating water column modelling. D. G Dorrell, J. R. Halliday, P. Millcr, M. Findlater . 2004.

#### CAPITOLO 4

- [1] <http://www.westwave.ie/>
- [2] <http://www.westwave.ie/technologies/>
- [3] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/>
- [4] <http://www.aquamarinepower.com/technology/how-oyster-wave-power-works/>
- [5] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/>
- [6] <http://www.aquamarinepower.com/news/aquamarine-power-releases-performance-data-and-details-of-planned-improvements-to-oyster-800/>
- [7] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/eon-uk/>
- [8] <http://www.pelamiswave.com/pelamis-technology>
- [9] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/eon-uk/>
- [10] <http://www.businessgreen.com/bg/news/2279113/eon-waves-adieu-to-pelamis-marine-power-project>
- [11] <http://www.oceanenergy.ie/news/?p=437>
- [12] <http://www.oceanenergy.ie/oe-technology/platform.html>
- [13] <http://www.oceanenergy.ie/news/?p=437>
- [14] <http://www.wavebob.com/overview/>
- [15] <http://www.wavebob.com/key-features/>
- [16] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/wello-oy/>
- [17] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/wello-oy/>
- [18] <http://www.wello.eu/penguin.php>
- [19] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/wello-oy/>
- [20] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/seatricity/>
- [21] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/seatricity/>
- [22] <http://wavestarenergy.com/>
- [23] <http://wavestarenergy.com/concept>

- [24] <https://sites.google.com/site/oceanmilltest/services>
- [25] <http://www.oceanpowertechnologies.com/technology.htm>
- [26] <http://www.oceanpowertechnologies.com/technology.htm>
- [27] <http://www.oceanpowertechnologies.com/spain.html>
- [28] <http://www.oceanpowertechnologies.com/spain.html>
- [29] <http://www.carnegiewave.com/index.php?url=/projects/perthproject>
- [30]
- [http://greenthefuture.com/WAVEPOWER\\_HOWITWORKS\\_BUOY\\_CETO.html](http://greenthefuture.com/WAVEPOWER_HOWITWORKS_BUOY_CETO.html)
- [31] <http://www.langleewavepower.com/langlee-technology.html>
- [32] <http://www.langleewavepower.com/langlee-technology/generator-system.html>
- [33] <http://www.langleewavepower.com/langlee-technology/driving-costs-down.html>
- [34] <http://aw-energy.com/about-waveroller/waveroller-concept>
- [35] <http://aw-energy.com/about-waveroller/waveroller-concept>
- [36] <http://www.wavedragon.net/>
- [37] <http://www.wavedragon.net/>
- [38] <http://www.wavedragon.net/>
- [39] <http://www.awsocan.com/technology.aspx>
- [40] [http://www.waveforenergy.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=8&Itemid=114](http://www.waveforenergy.com/index.php?option=com_content&view=article&id=8&Itemid=114)
- [41] [http://www.waveforenergy.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=8&Itemid=114](http://www.waveforenergy.com/index.php?option=com_content&view=article&id=8&Itemid=114)
- [42] <http://www.40southenergy.com/>
- [43] <http://www.40southenergy.com/>
- [44] <http://www.veneziaenergia.it/index.php/progetti/75-energia-dalle-onde>
- [45] [http://www.giantgiem.it/produzione\\_energia.html](http://www.giantgiem.it/produzione_energia.html)
- [46] <http://www.wempower.it/en/wem-wave-energy/wem-state-of-the-art.html>
- [47] REWEC3: nuove dighe portuali per la produzione di energia elettrica dalle onde di mare. Felice Arena, Università mediterranea di Reggio Calabria. 2012.
- [48] [http://www.wavenergy.it/?page\\_id=393](http://www.wavenergy.it/?page_id=393)
- [49] Wave-powered desalination: resource assessment and review of technology . P.A. Davies. 2005
- [50] Wave-powered desalination: resource assessment and review of technology . P.A. Davies. 2005
- [51] Wave-powered desalination: resource assessment and review of technology . P.A. Davies. 2005



- [52] Evaluating the costs of desalination and water transport . Yuan Zhou , Richard S.J. Tol . 2004
- [53] Wave-powered desalination: resource assessment and review of technology . P.A. Davies. 2005
- [54] Wave-powered desalination: resource assessment and review of technology . P.A. Davies. 2005
- [55] The cost of water from an autonomous wave-powered desalination plant. Matt Folley, Trevor Whittaker. 2008
- [56] The cost of water from an autonomous wave-powered desalination plant. Matt Folley, Trevor Whittaker. 2008
- [57] The cost of water from an autonomous wave-powered desalination plant. Matt Folley, Trevor Whittaker. 2008

## CAPITOLO 5

- [1] [http://www.fp7-marinet.eu/about\\_marine-renewable-energy\\_wave-energy.html](http://www.fp7-marinet.eu/about_marine-renewable-energy_wave-energy.html)
- [2] [http://www.fp7-marinet.eu/about\\_test-stages-protocol.html](http://www.fp7-marinet.eu/about_test-stages-protocol.html)
- [3] <http://www.pico-owc.net/cms.php?page=541&wnsid=456f3662aa1d8d9ce324a61635844400>
- [4] <http://www.pico-owc.net/cms.php?page=542&wnsid=dbb177dd9668f08318207830330904df>
- [5] <http://www.pico-owc.net/cms.php?page=541&wnsid=456f3662aa1d8d9ce324a61635844400>
- [6] <http://www.save-pico-powerplant.org/>
- [7]
- [http://www.el.angstrom.uu.se/forskningsprojekt/WavePower/Lysekilsprojektet\\_E.html](http://www.el.angstrom.uu.se/forskningsprojekt/WavePower/Lysekilsprojektet_E.html)
- [8]
- [http://www.el.angstrom.uu.se/forskningsprojekt/WavePower/Lysekilsprojektet\\_E.html](http://www.el.angstrom.uu.se/forskningsprojekt/WavePower/Lysekilsprojektet_E.html)
- [9] <http://www.uu.se/en/news/news-document/?id=2422&typ=artikel&area=5&lang=en>
- [10] <http://www.emec.org.uk/facilities/wave-test-site/>
- [11] <http://green.thisted.dk/2013/03/danwec-test-station-for-wave-energy/?lang=en>
- [12] <http://green.thisted.dk/2013/03/danwec-test-station-for-wave-energy/?lang=en>
- [13] <http://www.wavehub.co.uk/about/location-of-wave-hub/>

- [14] <http://www.wavehub.co.uk/information-for-developers/technical-information/>
- [15] <http://www.wavehub.co.uk/about/>
- [16] [http://eng.kiost.ac/kordi\\_eng/main.jsp?sub\\_num=354&state=view&idx=248&ord=0](http://eng.kiost.ac/kordi_eng/main.jsp?sub_num=354&state=view&idx=248&ord=0)
- [17] <http://www.waveplam.eu/page/default.asp?id=427>
- [18] <http://www.eve.es/Promocion-de-inversiones/Proyectos-en-desarrollo/bimep.aspx>
- [19] <http://www.eve.es/Promocion-de-inversiones/Proyectos-en-desarrollo/bimep/Sobre-bimep/Localizacion-bimep.aspx>
- [20] <http://www.eve.es/Promocion-de-inversiones/Proyectos-en-desarrollo/bimep/Sobre-bimep/Instalaciones.aspx>
- [21] <https://sites.google.com/site/oceanmilltest/in-the-news>
- [22]
  
- [http://www.seai.ie/Renewables/Ocean\\_Energy/AMETS/Belmullet\\_WETS\\_info\\_brochure.pdf](http://www.seai.ie/Renewables/Ocean_Energy/AMETS/Belmullet_WETS_info_brochure.pdf)
- [23]
  
- [http://www.seai.ie/Renewables/Ocean\\_Energy/Belmullet\\_Wave\\_Energy\\_Test\\_Site/Frequently%20Asked%20Questions.html](http://www.seai.ie/Renewables/Ocean_Energy/Belmullet_Wave_Energy_Test_Site/Frequently%20Asked%20Questions.html)
- [24] <http://www.oceanpowertechnologies.com/spain.html>
- [25] <http://www.fp7-waveport.eu/>
- [26] [http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ\\_RCN=11323507](http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ_RCN=11323507)
- [27] <http://www.flansea.ugent.be/10-Press%20Release%20Wave%20Pioneer.pdf>
- [28] <http://www.offshorewind.biz/2012/06/29/belgium-thv-mermaid-awarded-concession-to-construct-final-north-sea-offshore-wind-farm/>
  
- [29] <http://www.oceanpowertechnologies.com/spain.html>
- [30] <http://www.portuguese-chamber.org.uk/Admin/uploads/Leaflet-Offshore-Renewables-pdf.pdf>
- [31] [http://www.carnegiewave.com/files/asx-announcements/2012/121210%20Env\\_Summary\\_Sheet\\_Rev0.pdf](http://www.carnegiewave.com/files/asx-announcements/2012/121210%20Env_Summary_Sheet_Rev0.pdf)
- [32] [http://www.carnegiewave.com/files/asx-announcements/2012/121210%20Env\\_Summary\\_Sheet\\_Rev0.pdf](http://www.carnegiewave.com/files/asx-announcements/2012/121210%20Env_Summary_Sheet_Rev0.pdf)
- [33] <http://www.waterpowermagazine.com/features/featurecoastal-conversions>
- [34] <http://www.waterpowermagazine.com/features/featurecoastal-conversions>
- [35] <http://www.power-technology.com/projects/mutriku-wave/>
- [36] Wave Power. Voith, www.wavegen.com
- [37] <http://www.pelamiswave.com/development-history>

- [38] <http://www.pelamiswave.com/development-history>
- [39] <http://www.pelamiswave.com/development-history>
- [40] <http://www.pelamiswave.com/our-projects/project/6/CEO-at-Agucadoura>
- [41] <http://www.pelamiswave.com/our-projects/project/6/CEO-at-Agucadoura>
- [42] <http://www.stornowaygazette.co.uk/news/local-headlines/western-isles-first-wave-farm-off-bernera-1-1905080>
- [43] <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/vattenfall/>
- [44] <http://www.vattenfall.com/en/rd-cases-for-ocean-energy.htm>
- [45] [http://www.rechargenews.com/news/wave\\_tidal\\_hydro/article1291610.ece](http://www.rechargenews.com/news/wave_tidal_hydro/article1291610.ece)
- [46] <http://www.aegirwave.com/the-shetland-project.aspx>
- [47] <http://www.aquamarinepower.com/news/aquamarine-power-secures-full-consent-for-40mw-lewis-wave-energy-farm/>
- [48] <http://www.oceanpowertechnologies.com/reedsport.html>
- [49] <http://www.oceanpowertechnologies.com/reedsport.html>
- [50] <http://www.oceanpowertechnologies.com/coos.html>
- [51] <http://www.oceanpowertechnologies.com/coos.html>
- [52] Energia da moto ondoso nel Mediterraneo: esempi di fattibilità e produttività. G. Bracco, E. Giorcelli, A. Gulisano, G. Mattiazzo e D. Poggi. 2011.
- [53] Energia da moto ondoso nel Mediterraneo: esempi di fattibilità e produttività. G. Bracco, E. Giorcelli, A. Gulisano, G. Mattiazzo e D. Poggi. 2011.
- [54] Il sistema energetico dell'isola di Pantelleria . Rodolfo Pasinetti, Ambiente Italia. 2012
- [55] L'innovazione si mette in moto ondoso. Dossier della rivista Nuova Energia del Febbraio 2012, pag.58-62. Giuliana Mattiazzo, Politecnico di Torino. 2012
- [56] L'innovazione si mette in moto ondoso. Dossier della rivista Nuova Energia del Febbraio 2012, pag.58-62. Giuliana Mattiazzo, Politecnico di Torino. 2012
- [57] L'innovazione si mette in moto ondoso. Dossier della rivista Nuova Energia del Febbraio 2012, pag.58-62. Giuliana Mattiazzo, Politecnico di Torino. 2012
- [58] L'innovazione si mette in moto ondoso. Dossier della rivista Nuova Energia del Febbraio 2012, pag.58-62. Giuliana Mattiazzo, Politecnico di Torino. 2012
- [59] [http://cleantechincubation.eu/wp-content/uploads/2012/07/2.4\\_W4E.pdf](http://cleantechincubation.eu/wp-content/uploads/2012/07/2.4_W4E.pdf), Ermanno Giorcelli. 2012
- [60]

[http://unpuntoneilmare.files.wordpress.com/2012/06/energia\\_da\\_moto\\_ondoso\\_politecnico-torino\\_ing\\_mattiazzo.pdf](http://unpuntoneilmare.files.wordpress.com/2012/06/energia_da_moto_ondoso_politecnico-torino_ing_mattiazzo.pdf)

[61]

[http://unpuntoneilmare.files.wordpress.com/2012/06/energia\\_da\\_moto\\_ondoso\\_p\\_olitecnico-torino\\_ing\\_mattiazzo.pdf](http://unpuntoneilmare.files.wordpress.com/2012/06/energia_da_moto_ondoso_p_olitecnico-torino_ing_mattiazzo.pdf)

[62] **Presentata ai Navicelli la prima macchina marina da parte di Enel Green Power**, [www.pisanews.net](http://www.pisanews.net). Simone Martini. 19/06/2013.

[63] <http://www.40southenergy.com/2013/06/launch-of-first-r115-machine/>

[64] <http://www.40southenergy.com/wave-parks/italy-puntarighini-wep/>

[65] REWEC3: nuove dighe portuali per la produzione di energia elettrica dalle onde di mare. Felice Arena, Università mediterranea di Reggio Calabria. 2012.

[66] REWEC3: nuove dighe portuali per la produzione di energia elettrica dalle onde di mare. Felice Arena, Università mediterranea di Reggio Calabria. 2012.

[67] REWEC3: nuove dighe portuali per la produzione di energia elettrica dalle onde di mare. Felice Arena, Università mediterranea di Reggio Calabria. 2012.

[68] REWEC3: nuove dighe portuali per la produzione di energia elettrica dalle onde di mare. Felice Arena, Università mediterranea di Reggio Calabria. 2012.

[69] Energia dalle onde: 10MW a Civitavecchia, [energyviews.ene.it](http://energyviews.ene.it). 15/10/2012.

[70] REWEC3: nuove dighe portuali per la produzione di energia elettrica dalle onde di mare. Felice Arena, Università mediterranea di Reggio Calabria. 2012.

[71] rewec 3, arrivano i primi cassoni per la produzione di energia elettrica. [www.ilfaroonline.it](http://www.ilfaroonline.it). 03/10/2012.

[72] Progettazione del primo prototipo di un nuovo dispositivo per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica. Felice Arena. 2011

[73] Vertical breakwaters in Italy with a REWEC3/3: Marina di Cicerone, working plan. [www.wavenergy.it](http://www.wavenergy.it).

[74] Design of the new Rewec3 for the commercial harbour of Salerno. [www.wavenergy.it](http://www.wavenergy.it)

## CAPITOLO 6

[1] Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine. ENEA. Documenti tecnici e aggiornamenti disponibili sul sito ENEA: [www.enea.it](http://www.enea.it). 2011.

[2] Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine. ENEA. Documenti tecnici e aggiornamenti disponibili sul sito ENEA: [www.enea.it](http://www.enea.it). 2011.

- [3] Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine. ENEA. Documenti tecnici e aggiornamenti disponibili sul sito ENEA: [www.enea.it](http://www.enea.it). 2011.
- [4] Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective . Luca Liberti, Adriana Carillo, Gianmaria Sannino. 2013.
- [5] Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective . Luca Liberti, Adriana Carillo, Gianmaria Sannino. 2013.
- [6] Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective . Luca Liberti, Adriana Carillo, Gianmaria Sannino. 2013.
- [7]

<http://www.gse.it/it/EnergiaFacile/guide/Energiaelettrica/Eolico/Pages/default.aspx>

[Gli incentivi del DM 6 luglio 2012](#)

- [8] Decreto Ministeriale 6 Luglio 2012. Ministero dello Sviluppo Economico
- [9] Decreto Ministeriale 6 Luglio 2012. Ministero dello Sviluppo Economico
- [10] Decreto Ministeriale 6 Luglio 2012. Ministero dello Sviluppo Economico
- [11] Decreto Ministeriale 6 Luglio 2012. Ministero dello Sviluppo Economico
- [12] Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America . G.J. Dalton, R. Alcorn, T. Lewis. 2009
- [13] Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America . G.J. Dalton, R. Alcorn, T. Lewis. 2009
- [14] Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America . G.J. Dalton, R. Alcorn, T. Lewis. 2009

## **CAPITOLO 7**

- [1] Large scale Environmental Impact Assessment of wave energy devices – A Guidance Document. Wavetrain Research Training Network Towards Competitive Ocean Wave Energy. Project coordinator name: António Sarmento. 2007
- [2] Large scale Environmental Impact Assessment of wave energy devices – A Guidance Document. Wavetrain Research Training Network Towards Competitive Ocean Wave Energy. Project coordinator name: António Sarmento. 2007
- [3] A method for EIA scoping of wave energy converters based on classification of the used technology . Lucia Margheritini, Anne Merrild Hansen, Peter Frigaard. 2011.

- [4] A method for EIA scoping of wave energy converters based on classification of the used technology . Lucia Margheritini, Anne Merrild Hansen, Peter Frigaard. 2011.
- [5] A method for EIA scoping of wave energy converters based on classification of the used technology . Lucia Margheritini, Anne Merrild Hansen, Peter Frigaard. 2011.
- [6] A method for EIA scoping of wave energy converters based on classification of the used technology . Lucia Margheritini, Anne Merrild Hansen, Peter Frigaard. 2011.
- [7] Large scale Environmental Impact Assessment of wave energy devices – A Guidance Document. Wavetrain Research Training Network Towards Competitive Ocean Wave Energy. Project coordinator name: António Sarmiento. 2007
- [8] A method for EIA scoping of wave energy converters based on classification of the used technology . Lucia Margheritini, Anne Merrild Hansen, Peter Frigaard. 2011.
- [9] [(power take off)A\_Method\_for\_EIA\_Scoping\_of\_Wave\_Energy\_Converters]
- [10] Large scale Environmental Impact Assessment of wave energy devices – A Guidance Document. Wavetrain Research Training Network Towards Competitive Ocean Wave Energy. Project coordinator name: António Sarmiento. 2007
- [11] A method for EIA scoping of wave energy converters based on classification of the used technology . Lucia Margheritini, Anne Merrild Hansen, Peter Frigaard. 2011.
- [12] Large scale Environmental Impact Assessment of wave energy devices – A Guidance Document. Wavetrain Research Training Network Towards Competitive Ocean Wave Energy. Project coordinator name: António Sarmiento. 2007
- [13] A method for EIA scoping of wave energy converters based on classification of the used technology . Lucia Margheritini, Anne Merrild Hansen, Peter Frigaard. 2011.
- [14] Large scale Environmental Impact Assessment of wave energy devices – A Guidance Document. Wavetrain Research Training Network Towards Competitive Ocean Wave Energy. Project coordinator name: António Sarmiento. 2007
- [15] Large scale Environmental Impact Assessment of wave energy devices – A Guidance Document. Wavetrain Research Training Network Towards Competitive Ocean Wave Energy. Project coordinator name: António Sarmiento. 2007
- [16] Large scale Environmental Impact Assessment of wave energy devices – A Guidance Document. Wavetrain Research Training Network Towards

Competitive Ocean Wave Energy. Project coordinator name: António Sarmento. 2007

[17] Large scale Environmental Impact Assessment of wave energy devices – A Guidance Document. Wavetrain Research Training Network Towards Competitive Ocean Wave Energy. Project coordinator name: António Sarmento. 2007