

Università degli Studi di Padova

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria dell'Informazione

TESINA DI LAUREA TRIENNALE

Energia dal moto ondoso

Wave energy

Candidato:
Stefano Lissandron
Matricola 580440

Relatore:
Prof. Paolo Tenti

Anno Accademico 2009–2010

Sommario

Questa relazione introdurrà semplici aspetti relativi alla conversione dell'energia delle onde del mare. L'intento non è di fornire una trattazione dettagliata della conversione energetica, ma si vuole introdurre l'argomento cercando di far conoscere alcuni aspetti generali poco noti o addirittura sconosciuti. Per questo, un primo capitolo introdurrà intuitivamente dei concetti fisici legati all'energia trasportata dalle onde del mare, mentre un secondo capitolo cercherà di capire perché puntare su questa forma di energia rinnovabile. Poi, verranno presentate alcune tecniche di conversione energetica e quali possono essere le possibili conseguenze esterne della conversione stessa. Infine, un particolare convertitore verrà analizzato un po' più dettagliatamente alla luce di quanto presentato nell'intero documento.

Indice

Introduzione	1
1 Le onde del mare	5
1.1 Velocità di fase	6
1.2 Velocità di gruppo	7
1.3 Energia e potenza	10
2 Perché l'energia delle onde marine?	13
3 Conversione dell'energia	17
3.1 Classificazioni dei dispositivi	17
3.1.1 Classificazione in base alla posizione	18
3.1.2 Classificazione in base al principio	19
3.2 Le tecnologie in uso	20
3.2.1 Oscillating Water Columns (OWCs)	21
3.2.2 <i>Pelamis</i>	23
3.2.3 Overtopping devices	25
3.2.4 <i>Archimedes Wave Swing</i> (AWS)	27
3.2.5 Convertitori oscillanti	29
4 Impatto ambientale	33
4.1 Ambito idrodinamico	35
4.2 Dispositivi come habitat artificiali	35
4.3 Rumore ed effetti elettromagnetici	36
4.4 Aree vietate e barriere artificiali	38
4.5 Migrazioni	38
4.6 Emissioni	39
4.7 Altre possibili conseguenze	39
5 <i>Pelamis</i>	41
5.1 PTO del <i>Pelamis</i>	43
5.2 Impatto ambientale	47
5.3 Dispositivi installati	48

Conclusioni

49

Elenco delle figure

1	Distribuzione mondiale della potenza delle onde marine in mare aperto per unità di larghezza del fronte d'onda (in kW/m)	2
1.1	Formazione delle onde del mare	5
1.2	Moti circolari del fluido	6
1.3	Velocità di fase e velocità di gruppo	8
1.4	Effetto della sovrapposizione di due onde sinusoidali	9
1.5	Energia di un'onda sinusoidale superficiale	10
1.6	Potenza dell'onda per unità di fronte d'onda in funzione del periodo dell'onda T e dell'altezza d'onda $h = 2a$	11
2.1	Differenza tra l'energia fornita da un generatore ideale a sinistra e quella fornita da una fonte di energia intermittente a destra (energia eolica)	14
2.2	Grado di utilizzo per diverse fonti energetiche in Svezia	16
3.1	Le varie tecnologie di conversione dell'energia	20
3.2	Oscillating Water Column (OWC) - schema di principio	21
3.3	Schema del <i>Limpet</i> : OWC realizzato sulla costiera	23
3.4	Schema di un OWC galleggiante	23
3.5	Foto di <i>Pelamis</i> in mare della Ocean Power Delivery Ltd	24
3.6	<i>Duck</i> realizzato da Stephen Salter	25
3.7	Schema di principio degli <i>overtopping devices</i>	26
3.8	<i>Wave Dragon</i> : sopra una foto del dispositivo installato e sotto lo schema di principio analogo a quello visto in precedenza per gli <i>overtopping devices</i>	26
3.9	<i>Tapchan</i> realizzato in Norvegia a Toftestallen nel 1985	27
3.10	Schema di principio del <i>Archimedes Wave Swing</i>	28
3.11	Immagine di un impianto con <i>Archimedes Wave Swing</i>	29
3.12	Schema di un convertitore a boa realizzato in Svezia	30
3.13	Schema di un dispositivo <i>IPT buoy</i>	30
3.14	Vista frontale e laterale del <i>PS Frog Mk 5</i>	31

- 5.1 In alto è possibile osservare come viene installato *Pelamis* sulla superficie del mare. In basso è presentata una sezione di un'articolazione del convertitore 42
- 5.2 Schema della conversione energetica all'interno di *Pelamis* . . . 44

Introduzione

I mari e gli oceani contengono una formidabile quantità di energia. Questa energia si presenta in diverse forme, come correnti oceaniche, onde, maree, differenze di salinità o di temperatura, ecc. . . Tutte queste forme possono essere sfruttate dall'uomo al fine di produrre energia utile, ma al giorno d'oggi sono poco utilizzate e poco considerate. La possibilità di ricavare energia dal moto ondoso e dalle maree, in particolare, sta però attirando l'attenzione di ricerche e sviluppi negli ultimi anni. Attualmente, la forza dell'acqua viene impiegata nella conversione energetica in larga misura solo tramite i bacini idrodinamici, ma gli oceani costituiscono una sorgente energetica altamente sfruttabile non ancora largamente utilizzata.

In queste pagine concentreremo la nostra attenzione sull'energia che può essere prodotta sfruttando il moto delle onde del mare. La radiazione luminosa prodotta dal Sole riscalda le masse d'aria della Terra in modo differente, generando così i venti. Questi, soffiando sopra l'oceano, trasferiscono la loro energia all'acqua e creano le onde del mare, che possono viaggiare per migliaia di chilometri con poche perdite energetiche.

Il potenziale teorico dell'energia delle onde del mare o delle maree è immenso in quelle parti del mondo che hanno lunghe coste oceaniche. In particolare, le onde presentano una maggiore potenza nel lato occidentale dei continenti per via dei venti che soffiano da ovest verso est [11]. La potenza delle onde lungo le coste dell'Europa Occidentale, infatti, è sufficiente a coprire il fabbisogno energetico della stessa Europa Occidentale. Le proprietà fisiche delle onde fanno di loro una sorgente di energia molto interessante, che sta superando l'energia eolica e solare per alcune caratteristiche, ad esempio il loro essere più prevedibili rispetto ai venti o alla radiazione luminosa del Sole [8]. Le condizioni locali del mare tendono a variare molto lentamente nell'arco del tempo, quindi la potenza media delle onde può essere messa, con buona approssimazione, in relazione all'area geografica. Un'altra ottima approssimazione può essere fatta tra aree geografiche diverse: caratteristiche comuni per le onde possono essere associate anche ad aree estese fino a centinaia di chilometri quadrati [13].

In Europa è stato sviluppato un atlante dell'energia del moto ondoso (*WERATLAS*) nel 1998 a cura di *Pontes et al.* Questo documento stima che il contenuto energetico degli oceani e dei mari dell'Europa possa fornire circa

120 – 190 TW h/anno (1,4 – 2,2 GW) in mare aperto e 34 – 46 TW h/anno (4 – 5 GW) vicino alla costa. In figura 1 si può osservare una distribuzione globale approssimata della potenza delle onde del mare.



Figura 1: Distribuzione mondiale della potenza delle onde marine in mare aperto per unità di larghezza del fronte d'onda (in kW/m)

Sebbene le tecniche di conversione dell'energia dalle onde del mare non siano ancora molto sviluppate, si pensa che tale fonte di energia diventerà presto importante tanto quanto l'energia eolica e solare. L'energia presente nell'oceano ha una densità molto superiore rispetto a queste due altre forme di energia, infatti, a parità di energia, è necessaria un'estensione superficiale 15-20 volte superiore in ambito solare o eolico rispetto a quello marino. Un altro vantaggio dell'energia oceanica è che il grado di utilizzo - il rapporto tra l'energia prodotta in un anno e la capacità dell'impianto installato - è tipicamente il doppio di quello di un impianto di energia eolica. [11]

Il primo brevetto per lo sfruttamento dell'energia delle onde risale al 1799 (Girard and Son, Francia): le onde erano utilizzate per azionare delle pompe e delle seghe. Il primo vero dispositivo, una boa con una luce di navigazione auto-ricaricante, fu installato e attivato negli anni sessanta a Masuda in Giappone. Scienziati ed ingegneri iniziarono principalmente dopo il 1973 a studiare la conversione energetica che sfrutta il moto ondoso con ricerche e teorie, spinti dalla crisi petrolifera di quegli anni. La ricerca della massima efficienza caratterizzò le prime generazioni di convertitori che risultarono essere molto complessi, costosi e poco robusti. Così facendo, il settore perse un po' di interesse quando si uscì dalla crisi energetica, in quanto i prezzi dei combustibili fossili scesero. Alcuni progetti continuarono negli anni ottanta anche se con intensità di ricerca inferiore, anche in Europa. Negli anni novanta la Commissione Europea si interessò ai vari progetti e ripresero le

ricerche e gli sviluppi grazie anche agli investimenti comunitari. La ricerca continua ad essere portata avanti al giorno d'oggi, però molti punti risultano essere ancora oscuri o non trattati. [13]

Questa tesina non vuole essere una trattazione dettagliata della conversione energetica e delle relative problematiche, ma intende introdurre l'argomento cercando di far conoscere alcuni aspetti generali poco noti o addirittura sconosciuti. Per questo, inizialmente verranno introdotti concetti fisici semplici ed intuitivi relativi alla potenza delle onde del mare. Poi si cercherà di capire perché puntare sulle fonti energetiche rinnovabili e in particolare su quella che sfrutta il moto ondoso. Un capitolo presenterà in modo generale alcune tecniche per ricavare energia dal moto delle onde, mentre un altro approfondirà un convertitore particolare, alla luce di quanto visto nell'intero documento. Ci si soffermerà, pure, su un punto molto importante anche se ancora poco chiaro che è quello dell'impatto ambientale di questa conversione energetica.

Capitolo 1

Le onde del mare

Analizzare quanta energia possono trasportare le onde e le forze che agiranno su un dispositivo posto in mare sono due punti importanti per la realizzazione di un convertitore di energia che sfrutta il moto ondoso. In questa sezione verranno spiegate le fondamenta di queste analisi per illustrare i diversi principi, parametri coinvolti e gli ordini di grandezza in gioco.

Le onde superficiali del mare sono generate principalmente dal vento. Quando il vento soffia su un'onda in mare aperto, come mostrato in figura 1.1, l'aria si muove più velocemente vicino alla cresta dell'onda (punto A) e più lentamente vicino al ventre (punto B).

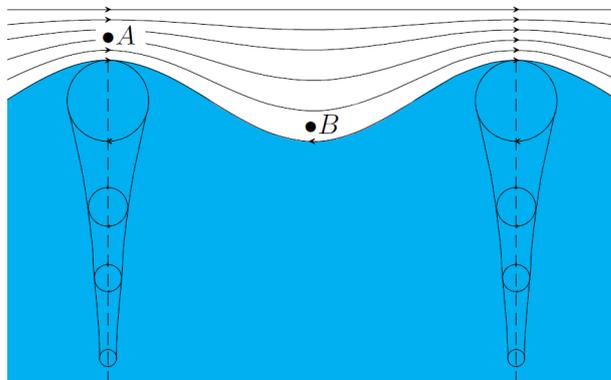


Figura 1.1: Formazione delle onde del mare

Nella dinamica intervengono diversi tipi di forze: la forza peso del liquido, la pressione atmosferica, la tensione superficiale. Un altro parametro importante è la profondità del fondale marino. L'analisi completa di tutti questi fattori risulterebbe molto complessa, perciò ci accontentiamo di dare delle giustificazioni fisiche di tipo intuitivo introducendo delle ipotesi semplificative, come svolto in [2]. Consideriamo onde marine in mari profondi, in modo da poter trascurare l'effetto del fondale marino. Questa ipotesi con-

siste nel considerare profondità delle acque molto superiori alla lunghezza d'onda λ .

Quando si applica una perturbazione sulla superficie di un liquido, si produce un moto degli elementi di liquido che stanno vicino alla superficie, come schematizzato in figura 1.2. Gli spostamenti di ogni singolo elemento di fluido hanno componente sia orizzontale che verticale; che debba esserci anche un moto orizzontale lo si intuisce dal fatto che, essendo il liquido praticamente incomprimibile, una parte di questo deve spostarsi dagli avvallamenti verso le creste, come affermato in [10]. In particolare, un elemento sulla cresta e uno sull'avvallamento hanno soltanto moto orizzontale di verso opposto. Si dimostra che le traiettorie dei singoli elementi sono circolari, per cui lo spostamento locale è in media nullo e non si ha, perciò, uno spostamento effettivo globale di materia sulla superficie.

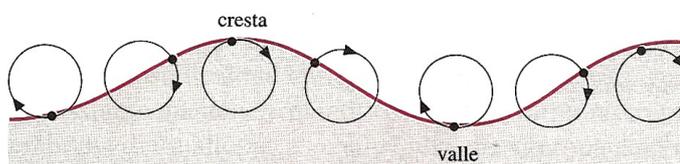


Figura 1.2: Moti circolari del fluido

1.1 Velocità di fase

Le onde che si creano in mare sono date dalla sovrapposizione di molte onde e perciò i profili delle onde marine possono risultare molto complicati. Per ora analizzeremo una singola onda sinusoidale di lunghezza infinita in mare profondo, come svolto in [2]. Ipotizzando che la pressione p sulla superficie sia costante, in quanto determinata dalla pressione atmosferica, applichiamo l'equazione di *Bernoulli*¹ a ventre e cresta:

$$p + \frac{1}{2}\rho v_v^2 + \rho g z = p + \frac{1}{2}\rho v_c^2 + \rho g (z + h)$$

dove v_v e v_c sono le velocità del fluido al ventre e alla cresta dell'onda rispettivamente, z rappresenta l'altezza del ventre e $z + h$ quella della cresta riferiti al fondo del mare² mentre ρ indica la densità di massa dell'acqua

¹Equazione di *Bernoulli*:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = cost$$

dove p è la pressione, ρ la densità di massa, v la velocità, g l'accelerazione di gravità e h l'altezza del fluido.

²Si noti che è irrilevante il sistema di riferimento per le altezze di ventre e cresta in quanto conta solo la differenza di altezza ovvero l'altezza dell'onda.

(circa 1025 kg/m^3). Segue che h è l'altezza dell'onda. Semplificando la precedente relazione otteniamo

$$v_v^2 - v_c^2 = 2gh \quad (1.1)$$

Ora consideriamo un sistema di riferimento che si muova alla velocità di propagazione dell'onda v_f , in modo tale che il profilo dell'onda rimanga invariato nel tempo ed eseguiamo un cambio di variabili. Il moto del fluido è, infatti, circolare con raggio dell'orbita superficiale r e con periodo di rotazione T che coincide con il periodo dell'onda.

$$v_v = \frac{2\pi r}{T} + v_f \quad , \quad v_c = \frac{2\pi r}{T} - v_f \quad (1.2)$$

Ora sostituendo le (1.2) in (1.1) e osservando che $h = 2r$, si può ricavare un'espressione per la velocità di propagazione dell'onda v_f

$$v_f = \frac{gT}{2\pi}$$

e introducendo $\lambda = v_f T$,³

$$v_f = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (1.3)$$

La velocità v_f ricavata è la velocità con cui si propaga la singola onda considerata e viene chiamata *velocità di fase*. Segue dall'equazione (1.3) che la velocità d'onda dipende esclusivamente dalla lunghezza d'onda e aumenta all'aumentare di questa.

1.2 Velocità di gruppo

Nelle considerazioni fin qui fatte si è parlato di una sola onda di estensione infinita, ma nella realtà le onde marine sono costituite dalla sovrapposizione di diverse onde tutte di lunghezza finita. Per giungere al nostro scopo, ovvero di ricavare quanta energia possono trasportare le onde marine, dobbiamo considerare un *pacchetto d'onde*. Un pacchetto d'onde infatti è un'onda di lunghezza e durata finita, costituita da più onde diverse ovvero con diverse lunghezze d'onda e diversi periodi. Da questo e da quanto visto prima in (1.3) discende che le varie onde che costituiscono il pacchetto si propagano con velocità diverse. Tale fenomeno viene detto *fenomeno della*

³Si ricordi che l'equazione d'onda piana è

$$\xi(x, t) = \xi_0 \sin(kx - \omega t)$$

dove $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ è il *numero d'onde* e $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ è la *pulsazione* dell'onda. La velocità di propagazione dell'onda è $v = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T}$.

dispersione e porta a una variazione della forma del pacchetto durante la propagazione. Ogni onda del pacchetto con numero d'onde k soddisfa alla:

$$\omega(k) = v_f(k) k$$

dove v_f è la velocità di fase trovata in precedenza e coincide con la velocità di propagazione per la singola onda.

La velocità con cui si propaga il pacchetto viene detta *velocità di gruppo* ed è generalmente diversa dalla velocità di fase (si veda figura 1.3). Intuitivamente, la velocità di fase non è altro che il rapporto tra la distanza percorsa da una cresta ed il tempo impiegato da quest'ultima per percorrerlo. Quindi se navighiamo in mare alla velocità di fase le onde ci appariranno stazionarie. Mentre la velocità di gruppo è la velocità con cui si muove il pacchetto d'onde ed è importante perché ad essa è legata l'energia trasportata dall'onda. Cerchiamo di determinare questa velocità partendo dall'analisi della

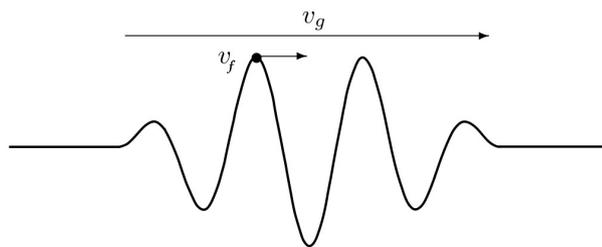


Figura 1.3: Velocità di fase e velocità di gruppo

sovrapposizione di due sole onde sinusoidali come fatto in [10], con numeri d'onde k_1 e k_2 , pulsazioni ω_1 e ω_2 e stessa ampiezza a :

$$\xi(x, t) = a \sin(k_1 x - \omega_1 t) + a \sin(k_2 x - \omega_2 t) \quad (1.4)$$

poniamo

$$\Delta k = k_1 - k_2 \quad , \quad k_m = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad , \quad \Delta \omega = \omega_1 - \omega_2 \quad , \quad \omega_m = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$

e trasformando la (1.4) con le formule di prostaferesi:

$$\xi(x, t) = 2a \cos\left(\frac{\Delta k}{2}x - \frac{\Delta \omega}{2}t\right) \sin(k_m x - \omega_m t) \quad (1.5)$$

Quest'onda è rappresentata in figura 1.4.

La velocità di fase media dell'onda risulta:

$$v_f = \frac{\omega_m}{k_m} \quad (1.6)$$

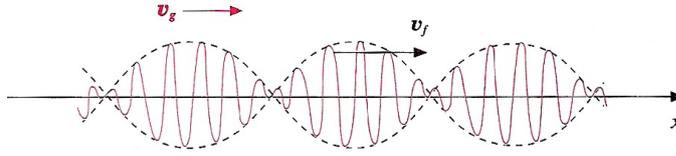


Figura 1.4: Effetto della sovrapposizione di due onde sinusoidali

ed è all'incirca uguale a quelle delle due componenti, $v_1 = \frac{\omega_1}{k_1}$ e $v_2 = \frac{\omega_2}{k_2}$, se $\omega_1 \simeq \omega_2$ e $k_1 \simeq k_2$. L'ampiezza dell'onda

$$\xi_0 = 2a \cos\left(\frac{\Delta k}{2}x - \frac{\Delta\omega}{2}t\right) \quad (1.7)$$

non è costante ma presenta una struttura di tipo ondulatorio, con velocità

$$v_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}$$

La velocità v_g con cui si propaga l'ampiezza è la velocità con cui avanza il pacchetto delle due onde e rappresenta quindi la velocità di gruppo nel caso considerato.

Quanto visto può essere generalizzato per la sovrapposizione di infinite onde sostituendo al rapporto delle variazioni la derivata. La velocità di gruppo è quindi data da

$$v_g(k) = \frac{d\omega}{dk}(k) \quad (1.8)$$

Per le onde del mare, ricordando l'uguaglianza (1.3):

$$\omega(k) = v_f(k)k = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}k = \sqrt{gk} \quad (1.9)$$

e derivando si ottiene la velocità di gruppo

$$v_g(k) = \frac{d\omega}{dk}(k) = \frac{1}{2} \frac{g}{\sqrt{gk}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{1}{2} v_f(k) \quad (1.10)$$

Abbiamo quindi trovato che la velocità di gruppo è la metà della velocità di fase.

1.3 Energia e potenza

Ci rimane da stimare quanta energia trasporta un'onda superficiale. Ricorriamo ancora una volta allo studio semplificato per un'onda sinusoidale del tipo

$$\xi(x) = a \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \quad (1.11)$$

come fatto in [2] e come mostrato in figura 1.5.⁴

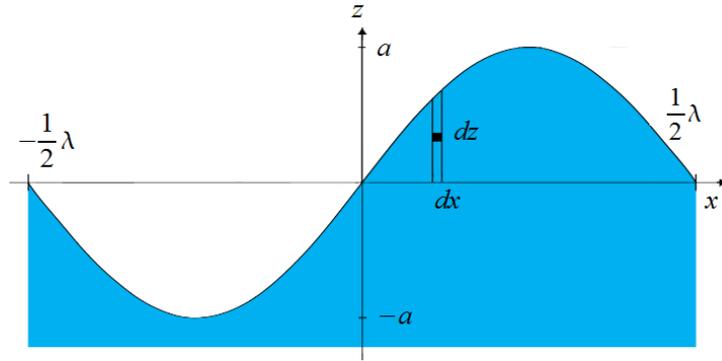


Figura 1.5: Energia di un'onda sinusoidale superficiale

L'energia potenziale della massa infinitesima $dm = \rho dx dz$ ⁵ di fluido subisce un incremento muovendosi da $-z$ a z di

$$dV = dm g (z - (-z)) = 2 \rho g z dx dz$$

Quindi, la variazione complessiva di energia potenziale del fluido è di

$$V = \int_{x=0}^{x=\frac{1}{2}\lambda} \int_{z=0}^{z=a \sin \frac{2\pi}{\lambda}x} z dz dx = \frac{1}{4} \rho g a^2 \lambda \quad (1.12)$$

Assumendo il principio dell'equipartizione dell'energia, ovvero che la variazione di energia cinetica media sia uguale alla variazione di energia potenziale media, possiamo concludere che l'energia totale di un'onda superficiale per unità di larghezza del fronte d'onda e per unità di lunghezza d'onda λ è

$$J_\lambda = \frac{2V}{\lambda} = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (1.13)$$

J_λ è quindi un flusso di energia ed è misurato in J/m^2 . Se moltiplichiamo J_λ per la velocità con cui avanza il pacchetto d'onda, ovvero le velocità con

⁴La dipendenza temporale è irrilevante in questa derivazione.

⁵La terza dimensione è stata tralasciata in quanto si sta cercando un'espressione di energia riferita all'unità di larghezza del fronte d'onda.

cui si trasmette l'energia, troviamo quanta potenza trasporta un'onda con larghezza del fronte d'onda unitaria:

$$P = J_\lambda v_g = \frac{1}{4} \rho g a^2 \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (1.14)$$

che viene misurata in W/m. Questa equazione può essere espressa in funzione del periodo dell'onda T ($\lambda = v_f T$) per giungere a

$$P = \frac{1}{4} \frac{\rho g^2 a^2 T}{2\pi} = \frac{\rho g^2 h^2 T}{32\pi} \quad (1.15)$$

Dalle due relazioni trovate per la potenza possiamo osservare che la potenza trasportata dalle onde è proporzionale alla radice quadrata della lunghezza d'onda λ oppure proporzionale al periodo dell'onda e al quadrato dell'altezza dell'onda. Un andamento della potenza P in funzione del periodo dell'onda T e dell'altezza d'onda $h = 2a$ si può osservare in figura 1.6.

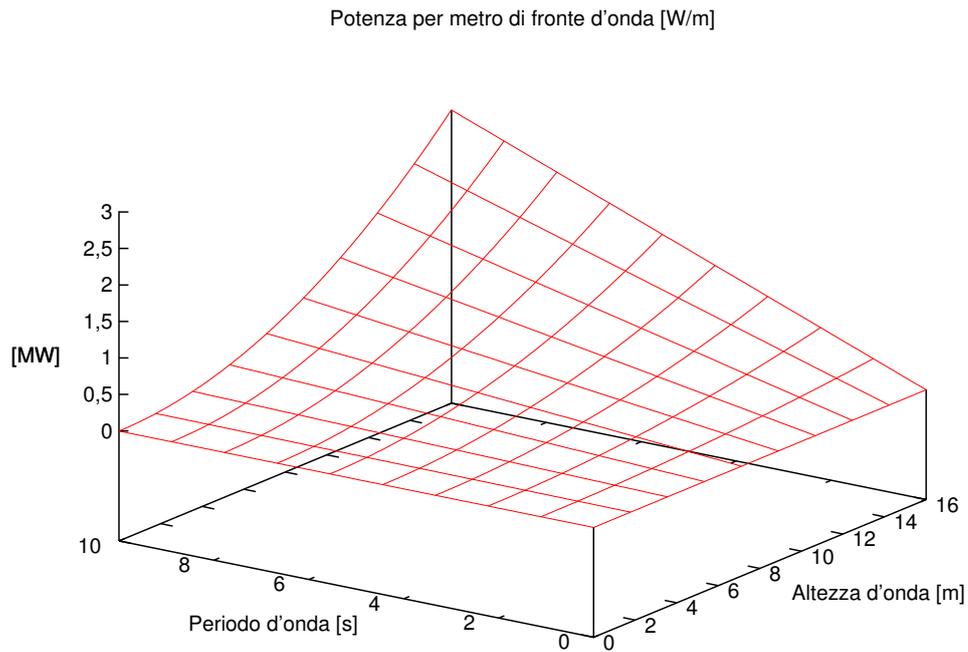


Figura 1.6: Potenza dell'onda per unità di fronte d'onda in funzione del periodo dell'onda T e dell'altezza d'onda $h = 2a$

Capitolo 2

Perché l'energia delle onde marine?

Molte fonti di energia rinnovabile, ad esempio l'energia eolica, solare e delle onde del mare, sono caratterizzate dal fatto di essere sorgenti energetiche intermittenti. Questo significa che non sono in grado di produrre energia in modo costante e continuativo, ma sono caratterizzate da degli andamenti irregolari e imprevedibili. Questa intermittenza è propria della natura di queste fonti. Si pensi ad esempio al caso dell'energia solare: durante una giornata nuvolosa l'energia che può essere prodotta dall'impianto sarà nettamente inferiore rispetto ad altre giornate più soleggiate.

La differenza tra dispositivi intermittenti e non sta tutta nella controllabilità dell'energia in ingresso del convertitore. La controllabilità non si ha per le fonti di energia rinnovabile, generalmente, perché dipendenti dalla natura, mentre la si ha per gli altri tipi di fonte, come ad esempio l'energia nucleare. Questo è certamente un difetto per le energie rinnovabili e intermittenti, però un ovvio e forse più importante vantaggio di queste fonti è che non sono richiesti dei carburanti, potendo così eliminare le emissioni di biossido di carbonio. In figura 2.1 si può vedere la differenza tra fonti energetiche intermittenti e non. [9]

L'energia elettrica non può essere accumulata; deve essere generata e consumata allo stesso tempo [9]. Al giorno d'oggi, gli impianti di energia rinnovabile sono ancora limitati e quindi la rete elettrica può gestire con relativa facilità queste poche fonti di energia intermittente senza incorrere in problemi di instabilità o addirittura di *blackouts*. In un futuro prossimo, per poter sfruttare al massimo i vantaggi delle fonti rinnovabili, e quindi intermittenti, bisognerà intervenire sulla rete per stabilizzarla e controllarla. Infatti, più fonti di energia intermittente ci sono connesse alla rete e più questa tende a diventare instabile, con il rischio di diventare inaffidabile e inutilizzabile. Il motivo è legato alla scarsa qualità dell'energia prodotta dalle fonti intermittenti. A questo problema non sono soggette le fonti di

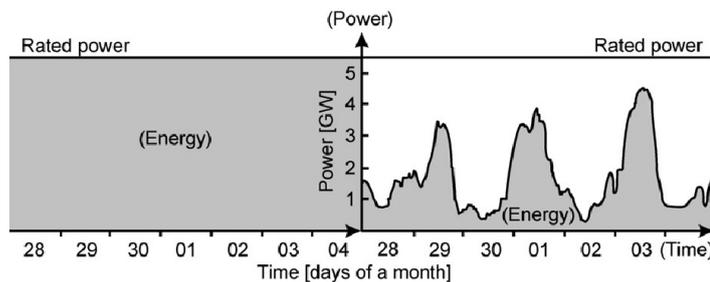


Figura 2.1: Differenza tra l'energia fornita da un generatore ideale a sinistra e quella fornita da una fonte di energia intermittente a destra (energia eolica)

energia stabile, le quali richiedono controlli minori sulla rete e quindi costi minori. Attualmente, l'unica fonte di energia rinnovabile stabile sfruttata è quella derivante dai bacini idrodinamici perché in questi è possibile controllare un eventuale accumulo energetico (energia potenziale immagazzinata nel bacino). [9]

Le relazioni tecniche che presentano i dati delle varie tecnologie relative a fonti di energia rinnovabile, anche diverse, parlano spesso di potenza nominale (*rated power*). Questo concetto, però, risulta ambiguo soprattutto se si vogliono confrontare fonti energetiche diverse perché non dà un'idea di quanta energia produce normalmente l'impianto ma piuttosto quanta ne potrebbe produrre. La potenza nominale dà infatti solo un limite massimo alla potenza generabile dall'impianto. Per ovviare a questo fatto si introducono degli indici di utilizzo: nel nostro caso considereremo il *grado di utilizzo* come fatto in [9]. Questo coefficiente, che è dato dal rapporto tra l'energia prodotta in un anno dall'impianto e quella massima producibile (legata alla potenza nominale), viene espresso in termini percentuali. Esso è generalmente indicato con un rapporto di ore all'anno di energia generata alla massima potenza (ore/anno).

I vantaggi delle sorgenti energetiche non intermittenti è che generano sempre energia alla potenza nominale. Questo è un bene per l'economia dell'impianto in quanto questo viene sfruttato sempre alla potenza massima o comunque ad una potenza molto alta. Diversamente per le sorgenti intermittenti, il costo dell'impianto è determinato dalla potenza nominale (massima generabile) e non è legato all'energia che viene effettivamente prodotta. La potenza nominale non deve quindi essere fissata troppo alta altrimenti si rischia di pagare troppo un impianto che non fornirà mai tale potenza in quanto le risorse naturali sono limitate e intermittenti.

In figura 2.2 si possono osservare vari gradi di utilizzo di diverse fonti energetiche in Svezia. Questi sono valori medi non generalizzabili, tratti da [9], in quanto le percentuali possono variare da paese a paese. Alti gra-

di di utilizzo indicano che è possibile controllare la produzione energetica. Ad esempio, l'energia nucleare (fonte energetica non rinnovabile) è caratterizzata da un alto grado di utilizzo (prossimo all'85%) perché gli impianti nucleari possono produrre sempre molta energia, tranne quando vengono spenti per manutenzione. Un'altra fonte che ha un alto grado di utilizzo è quella geotermica; gli impianti geotermici sfruttano il calore della Terra per produrre energia. Come prima accennato, si ritrova l'energia idrodinamica tra quelle con più alto grado di utilizzo (circa 60%). Questo è legato al fatto che l'energia idrodinamica può essere accumulata in bacini prima di essere convertita, permettendo di controllare la produzione energetica. Il suo grado di utilizzo potrebbe essere molto più alto perché è possibile far funzionare l'impianto ininterrottamente, ma in realtà di notte, quando il consumo energetico è inferiore, la produzione viene rallentata allo scopo di poter regolare la potenza immessa in rete.

Tra le fonti energetiche rimanenti si osserva che l'energia solare è caratterizzata da un basso grado di utilizzo in quanto le ore in cui è possibile sfruttare le radiazioni luminose sono limitate dall'orario e dal clima. Analoghe considerazioni si possono fare per l'energia eolica, che presenta un grado di utilizzo un po' superiore ma comunque abbastanza basso. Le differenze tra il grado di utilizzo dell'energia eolica in mare e quella sulla terraferma sono dovute al fatto che quando i venti raggiungono la terra vengono rallentati da diversi ostacoli, come alberi per esempio.

Per quanto riguarda l'energia del mare (onde, correnti e maree) si osserva un grado di utilizzo maggiore: dal 35% fino al 70% in condizioni favorevoli. Questo è dovuto all'accumulo energetico che caratterizza i mari e gli oceani; infatti, anche se il vento non soffia più le onde e le correnti possono fornire energia ugualmente. Inoltre, l'energia dei mari presenta una densità molto superiore rispetto a quella eolica e solare e risulta essere anche più prevedibile.

L'energia geotermica, con una produzione annuale di circa 54 TW h [9], ha guadagnato ingiustamente al giorno d'oggi molta meno attenzione dell'energia solare ed eolica. L'energia delle onde del mare e delle correnti è abbastanza ignorata nei piani futuri per le energie rinnovabili, fatto che non corrisponde al suo potenziale economico.

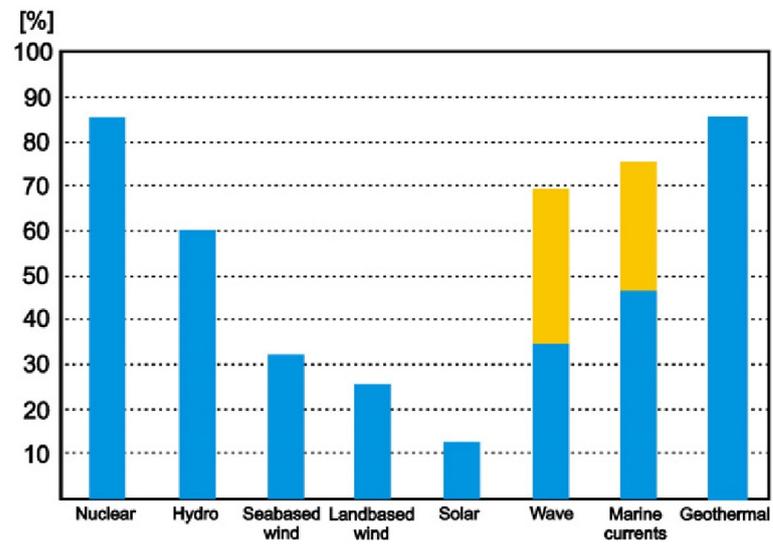


Figura 2.2: Grado di utilizzo per diverse fonti energetiche in Svezia

Capitolo 3

Conversione dell'energia

La ricerca scientifica sull'energia ottenibile sfruttando il moto ondoso iniziò negli anni settanta, spinta dalla crisi energetica, e da allora numerosi dispositivi per la conversione dell'energia sono stati proposti. Tuttavia, solo pochi di questi sono stati oggetto di ricerche, sviluppi e utilizzo in larga scala. I dispositivi per la conversione dell'energia delle onde del mare vengono chiamati *wave energy converters* in inglese, oppure abbreviando *WECs*.

3.1 Classificazioni dei dispositivi

L'energia trasportata dalle onde è influenzata da molti fattori, tra i quali la distanza dalla costa. I convertitori di energia possono, perciò, essere classificati in base alla loro posizione, come fatto in [3]:

- *shoreline devices* (a linea di costa);
- *near to shore devices* (vicini alla costiera);
- *offshore devices* (in mare aperto).

Le onde del mare mentre si avvicinano alla linea di costa possono variare la loro direzione, a causa della rifrazione¹, oppure perdere potenza trasportata, per l'attrito con il fondo del mare e per la rottura delle onde (fenomeno del *wave breaking*). In altri casi, la rifrazione delle onde può causare un concentrazione dell'energia in punti specifici (*hot spots*) anche in prossimità della costa su fondali convessi, soprattutto nelle vicinanze dei promontori. Le perdite di energia dipendono dalla ripidità e dalla ruvidità del fondale e possono causare anche un dimezzamento dell'energia trasportata vicino alla costiera rispetto a quella trasportata a largo. Tuttavia, le differenze di

¹La rifrazione è la deviazione subita da un'onda che ha luogo quando questa passa da un mezzo fisico ad un altro con diversa velocità di propagazione.

energia a varie distanze dalla costa possono essere notevolmente contenute nel caso di fondi del mare lisci e molto ripidi che presentano profondità considerevoli anche vicino alla costa.

Come detto prima, l'energia ricavabile con convertitori posti sulla linea di costa risulta spesso inferiore a quella ricavabile con dispositivi situati in acqua ma vicino alla linea di costa (*near to shore devices*) o in mare aperto (*offshore devices*). Oltre a questa ragione se ne possono trovare altre che sconsigliano l'impiego di dispositivi su costa (*shoreline device*), come per esempio la conformazione della costa non adeguata, l'eccessiva variazione del livello del mare a causa delle maree e gli impatti ambientali.

Un elevato numero di convertitori di energia sono stati sviluppati da industrie e gruppi di ricerca in tutto il mondo. Non ci sono idee concordanti su quale sia la migliore tecnologia, sebbene si stia assistendo ad una graduale convergenza verso alcuni fondamentali approcci per la conversione. Anche se sono stati disegnati diversi dispositivi e testati in laboratorio, solo pochi di questi sono passati alle prove in mare.

3.1.1 Classificazione in base alla posizione

Una suddivisione in base alla posizione si ritrova in vari testi e articoli che trattano il tema dell'energia dal moto ondoso, in particolare in [3, 13].

Shoreline devices

I dispositivi a linea di costa possono essere fissati sul fondo del mare dove l'acqua è bassa, integrati in strutture frangiflutti o fissati alle costiere rocciose. Possono essere costruiti sia sulla terra che nel mare ma comunque sempre molto vicini alla costa in modo da garantirvi un accesso permanente, comportando anche la facilità di manutenzione (e riduzione dei costi) e di installazione. Altri pregi sono l'inutilità di ormeggi profondi e di cavi elettrici lunghi per il trasporto dell'energia.

Ricordiamo che a sfavore gioca però la quantità di energia ricavabile dal moto ondoso che risulta generalmente inferiore molto vicino alla costa. Tuttavia esistono alcune aree dove si assiste a fenomeni consistenti di concentrazione dell'energia (*hot spots*).

Near to shore devices

Parlando di *near to shore devices* si pensa a dispositivi impiegati in acque con profondità ridotta ($10 \div 20$ metri) e non troppo lontani dalla costa (dalle centinaia di metri ad alcuni chilometri). In questo modo è possibile collegare grandi dispositivi anche sul fondo del mare. La scelta di realizzare questi dispositivi cerca di evitare i difetti visti per i *shoreline devices* e di evitare ormeggi troppo profondi; è un compromesso tra le altre due tipologie.

Fissando il dispositivo sul fondo si può sfruttare maggiormente il moto ondoso rispetto ai convertitori fluttuanti. I difetti si trovano, però, negli estremi carichi dovuti alle onde che i dispositivi devono sopportare e il costo per unità che risulta incrementato.

Offshore devices

I convertitori posti in mare aperto hanno lo scopo di sfruttare il più grande contenuto energetico delle onde in acque profonde (solitamente più di 50 metri). In passato lo sviluppo di tali dispositivi incontrò molte difficoltà legate alla scarsa affidabilità e al costo eccessivo di manutenzione. L'affidabilità è un requisito importante che in questi dispositivi diventa fondamentale per evitare grosse spese di manutenzione legate alla collocazione di questi impianti. Altre problematiche si trovano nelle grosse perdite legate alle lunghezze dei cavi di collegamento per trasferire l'energia e all'interferenza che impianti multi-dispositivo creano alla navigazione.

3.1.2 Classificazione in base al principio

Un'altra classificazione può essere fatta suddividendo i dispositivi per la conversione di energia in base al principio su cui si basano, come si legge in [11, 13].

Oscillating Water Columns (OWC)

Detti anche colonne d'acqua oscillanti, gli OWC sono dei convertitori costituiti da una camera d'aria in cui il livello dell'acqua sale e scende con le onde del mare. La variazione del livello dell'acqua si ripercuote in una variazione della pressione nella camera che generalmente aziona una turbina.

Hinged contour devices

Questi dispositivi sono composti di più parti incernierate tra di loro; consentono la conversione di energia attraverso il moto relativo tra le varie parti generato dal passaggio delle onde del mare.

Buoyant moored devices

Sono convertitori che presentano una parte oscillante che si muove a causa del moto ondoso. L'energia viene estratta dalle oscillazioni che possono avvenire dall'alto in basso oppure attorno ad un asse.

Overtopping devices

Sono dei bacini in cui l'acqua si riversa aumentandone il livello medio dell'acqua stessa. La produzione di energia avviene quando l'acqua lascia il bacino attraverso una turbina che mette in movimento un generatore.

3.2 Le tecnologie in uso

Diversamente da altre fonti di energia rinnovabile, esiste un'ampia varietà di convertitori di energia che sfruttano il moto ondoso. Tale varietà è il risultato dei diversi modi in cui l'energia può essere assorbita dalle onde, le differenti collocazioni dei dispositivi e profondità dei fondali marini. Recensioni attuali hanno individuato circa un centinaio di progetti a vari stadi di sviluppo [6]. Il numero, inoltre, non sembra in decrescita perché nuovi concetti e tecnologie sono presentati in continuazione in modo da rimpiazzare quei progetti che vengono abbandonati.

Diverse classificazioni sono state proposte, tra cui quelle viste nella sezione precedente 3.1. In figura 3.1 è possibile osservare una schematizzazione dei vari tipi di convertitori basata prevalentemente sul principio di funzionamento. Questa sezione non ha l'intento di fornire un'esaustiva panoramica su tutte le tipologie di convertitore ma presenterà, piuttosto, alcune tra le più diffuse e più note.

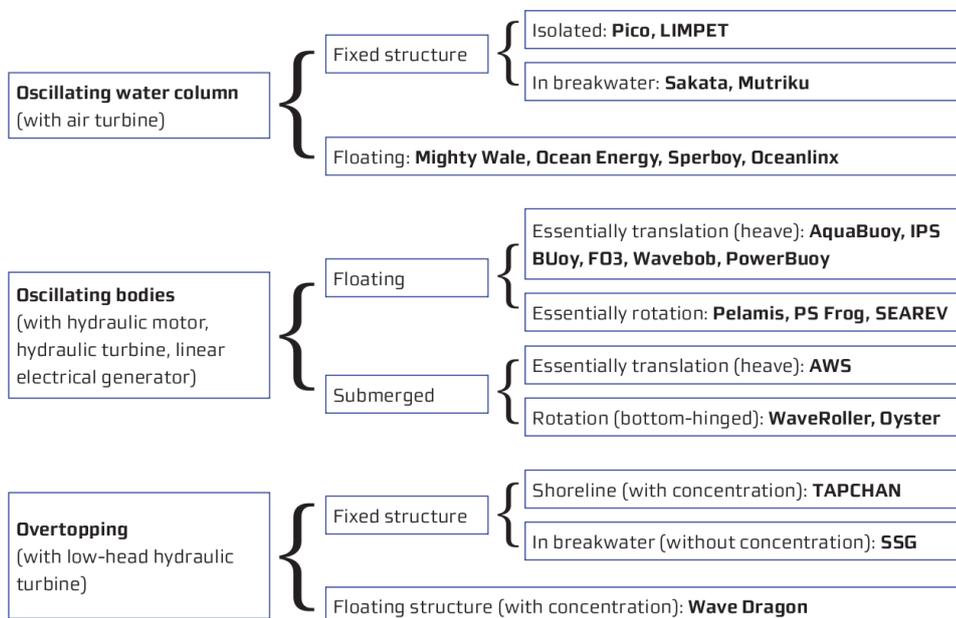


Figura 3.1: Le varie tecnologie di conversione dell'energia

3.2.1 Oscillating Water Columns (OWCs)

Questo è il dispositivo più in rilievo tra quelli che utilizzano una turbina per la conversione dell'energia. L'OWC è il convertitore di energia da onde marine più maturo in termini di numero e durata di prototipi già installati in mare [11, 13]. Tale dispositivo, costituito da una camera d'aria ancorata parzialmente immersa nell'acqua e aperta alla base (si veda figura 3.2), fu concepito negli anni settanta. Le onde marine producono all'interno

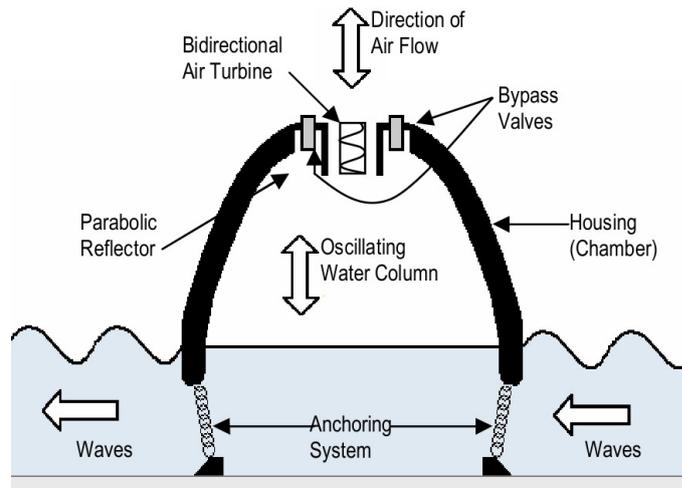


Figura 3.2: Oscillating Water Column (OWC) - schema di principio

della camera una variazione dell'altezza dell'acqua che si ripercuote in una variazione della pressione dell'aria all'interno della camera stessa. Questa variazione di pressione aziona una turbina sia mentre il livello dell'acqua scende sia mentre risale. A causa del flusso bidirezionale di aria, la turbina dovrà essere realizzata in modo da ruotare in una sola direzione indipendentemente dalla direzione del flusso d'aria stesso. Per questo motivo vengono solitamente utilizzate delle turbine *Wells*, inventate nella metà degli anni settanta che non necessitano di valvole di rettifica per il flusso d'aria [6].

Il dimensionamento della camera d'aria è di fondamentale importanza e va fatto in base a dove andrà collocato il dispositivo, ovvero in relazione alle lunghezze d'onda e ai periodi tipici delle onde che troverà. Se questo non viene fatto correttamente e specificatamente, possono manifestarsi dei fenomeni di risonanza all'interno della camera che possono portare ad un annullamento del flusso d'aria passante attraverso la turbina.

Gli OWC sono dispositivi che possono essere collocati sia sulla linea di costa (*shoreline devices*) sia in prossimità delle costa (*near to shore devices*). Essi possono essere fissati saldamente al fondale marino oppure possono essere collegati tramite un sistema di fissaggio "debole" che consente una ri-

sposta alla variazione del livello medio dell'acqua, ad esempio a causa delle maree. Nella scelta del tipo di ancoraggio sono necessari diversi compromessi. Ovvi problemi possono nascere con i dispositivi fissi qualora si assista a notevoli variazioni del livello medio del mare, mentre il sistema di fissaggio mobile consente una maggiore flessibilità in mari mossi e il cui livello medio varia di molto. D'altra parte però i dispositivi fissati completamente al fondale consentono di raccogliere maggiori energie in quanto sono fermi e producono maggiori resistenze alle onde. Infine anche i costi sono differenti: i dispositivi mobili sono più economici in quanto non necessitano di rigide fondamenta, come nel caso di convertitori fissi.

La categoria degli OWC raccoglie dispositivi diversi al suo interno, ma tutti si basano sul principio della colonna d'acqua oscillante. Due grandi OWC sono operativi in Europa: l'impianto energetico *Pico* (ad Azores in Portogallo, installato nel 1999) e il *Limpet* (a Islay in Gran Bretagna, installato nel 2000). Questi tipi di OWC hanno la colonna d'aria scavata e costruita direttamente sulla costiera; si può vedere uno schema di questi in figura 3.3. Altri impianti sono situati in India (Vizhinjam, vicino a Trivandrum, stato di Kerala, 1999) e in Giappone (Sakata, 1990) [3, 6, 13]. Il più grande impianto di tutti, un dispositivo posto vicino alla costa, chiamato *Osprey*, fu distrutto dal mare nel 1995 (era situato in Scozia). I primi OWC realizzati furono di tipo galleggiante: la colonna d'aria veniva tenuta vicino alla superficie del mare da delle boe (si veda in figura 3.4) tra gli anni sessanta e settanta soprattutto in Giappone [6].

Gli OWC installati finora riescono a produrre dai 500 kW a 1 MW (2 MW per *Osprey*) di potenza di picco con turbine di diametro rispettivamente di 2 m e 3,5 m. Queste grosse turbine *Wells* consentono di immagazzinare molta energia cinetica e l'effetto volano consente di ridurre le fluttuazioni della potenza elettrica rilasciata nella rete. Per questo motivo tali dispositivi sono meglio accettati per l'erogazione di energia elettrica in reti piccole per quanto riguarda la qualità della potenza.

A causa della camera d'aria, gli OWC richiedono grandi strutture di base: gli impianti più potenti hanno una sezione al livello medio dell'acqua di $100 \div 400 \text{ m}^2$ e altezze di $10 \div 20 \text{ m}$. Come conseguenza, il costo di un singolo dispositivo è piuttosto alto, tuttavia, i costi possono essere ridotti integrando i dispositivi in strutture frangiflutti.

Fu dimostrato già negli anni ottanta che era possibile migliorare l'assorbimento energetico degli OWC estendendo le camere con delle pareti che si protendono nell'acqua. Questa sorta di "braccia" formano un collettore che indirizza più onde verso l'apertura della camera. Questo concetto è stato sfruttato da diversi OWC e in particolare da una compagnia australiana Energetech, che realizzò un prototipo testato a Port Kembla in Australia nel 2005 [6].

Un'unica caratteristica accomuna i vari dispositivi OWC ed è l'assenza di parti meccaniche a stretto contatto con l'acqua. L'assenza di parti mobili,

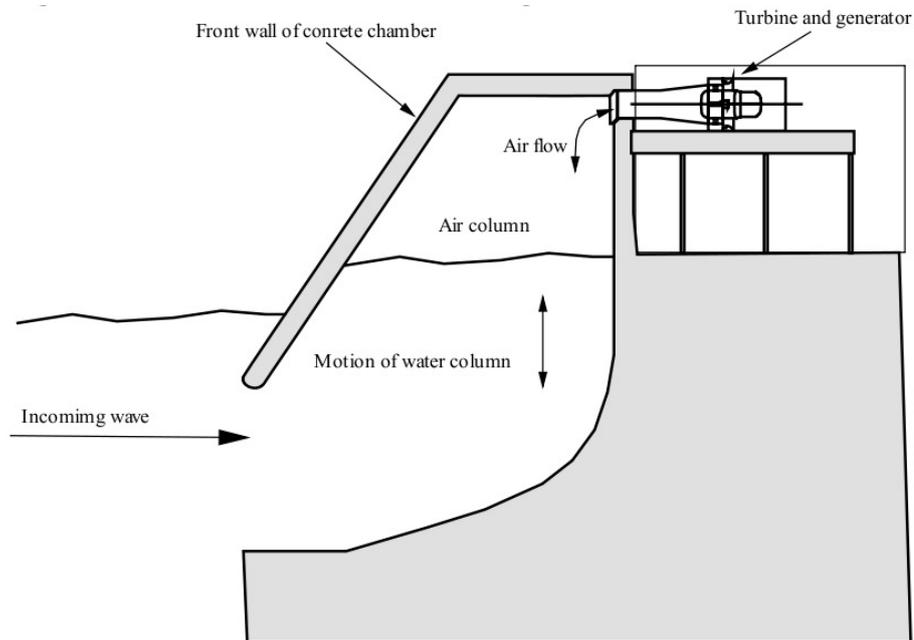


Figura 3.3: Schema del *Limpet*: OWC realizzato sulla costiera

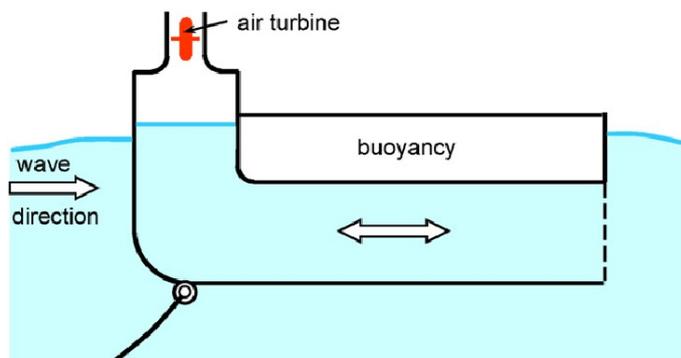


Figura 3.4: Schema di un OWC galleggiante

che devono resistere faticosamente a grossi carichi ripetitivi, rappresenta un vantaggio in termini di affidabilità.

3.2.2 *Pelamis*

Pelamis è un convertitore di energia prodotto da Ocean Power Delivery Ltd (Scozia, UK) costituito da diverse parti mobili connesse tra loro (si veda figura 3.5). Installato in mare aperto, questo dispositivo galleggiante

è composto da quattro corpi cilindrici interconnessi in serie da articolazioni mobili e presenta una forma allungata [13]. Le onde del mare mettono in movimento relativo i vari corpi del *Pelamis* i quali, a loro volta, muovono le articolazioni che azionano dei pistoni meccanici situati all'interno dei corpi cilindrici. I pistoni sono collegati a dei generatori elettrici che producono energia. La rigidità delle articolazioni deve essere regolata in base alle condizioni del mare. Per l'affidabilità, il dispositivo deve essere orientato quasi parallelamente alla direzione delle onde e per questo servono degli ormeggi. Inoltre, per ridurre le forze che spostano il convertitore, questo dovrà avere un'area della sezione trasversale il più ridotta possibile. Per maggiori dettagli sul convertitore si veda il capitolo 5.



Figura 3.5: Foto di *Pelamis* in mare della Ocean Power Delivery Ltd

Un prototipo fu costruito e sviluppato in acqua per test in Orkney (Gran Bretagna); con la sua lunghezza complessiva di 150 m può raggiungere 750 kW di potenza prodotta. La ditta affermò che i test furono soddisfacenti e nell'agosto del 2004 il prototipo fu connesso alla rete elettrica. *Pelamis* rappresenta un convertitore di energia di ultima generazione.

Il principio di base del *Pelamis* non è completamente nuovo, ma deriva da esperienze passate quali *Cockerell Raft* (composto da delle parti mobili interconnesse a formare una maglia posta sulla superficie dell'acqua) e *Duck*. Quest'ultimo è un dispositivo posto in mare aperto che fu realizzato per la prima volta da Stephen Salter nel 1974 [13]. *Duck* è un dispositivo composto di diverse parti collegate aventi sezione a forma di camma disposte in serie lungo lo stesso asse di rotazione, perpendicolare alla direzione delle onde (si veda figura 3.6). Il dispositivo realizzato da Salter sfruttava sia l'energia

cinetica che quella potenziale delle onde, quindi era caratterizzato da un'alta efficienza. A causa della tecnologia particolare impiegata, i costi per *Duck* furono molto elevati e questo intralcìò il suo sviluppo. Sebbene *Duck* sia stato un progetto su cui lavorarono molti ricercatori per molto tempo, esso non riuscì mai ad arrivare alla fase di produzione ed installazione in mare; furono realizzati solamente alcuni prototipi di prova.

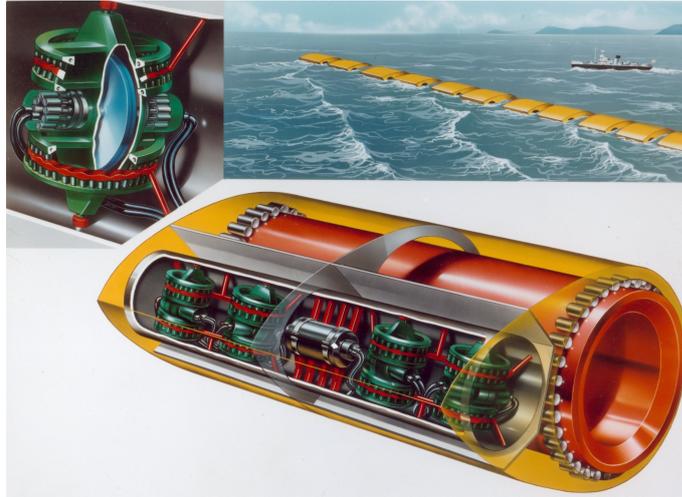


Figura 3.6: *Duck* realizzato da Stephen Salter

3.2.3 Overtopping devices

Una tecnica diversa per convertire l'energia delle onde è quella di catturare l'acqua che è vicina alla cresta dell'onda e farla confluire in un bacino dove l'acqua si trova ad un livello più alto di quello medio del mare. L'acqua viene poi fatta uscire dal bacino per riversarsi in mare attraverso una turbina al fine di produrre energia. I dispositivi che sfruttano l'energia potenziale dell'acqua in questo modo sono chiamati *overtopping devices* e funzionano come bacini idroelettrici (si veda figura 3.7) [6, 11].

Tali dispositivi possono essere collocati sulla linea di costa o vicino alla costa, ma la seconda collocazione è preferita. Come gli OWC, il dispositivo *overtopping* può essere collegato al fondale marino con ormeggi mobili o fissi con gli stessi risultati visti nella sezione 3.2.1. Evidenziamo che gli *overtopping devices* non sono comuni tanto quanto gli *oscillating water columns* [11].

Wave Dragon è un esempio di dispositivo *overtopping* sviluppato da Wave Dragon Aps/Spok Aps (Danimarca) [13]. È un dispositivo galleggiante posto in mare aperto che non presenta parti mobili, si veda figura 3.8. Il dispositivo viene fatto galleggiare sopra al livello del mare e come princi-

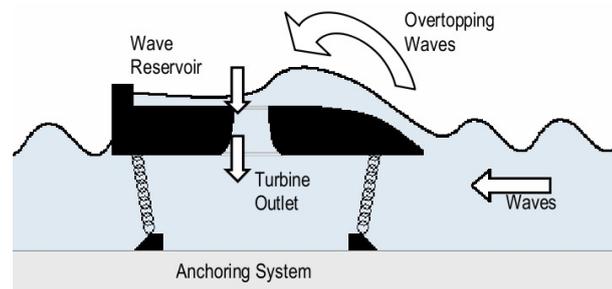


Figura 3.7: Schema di principio degli *overtopping devices*

pio sfrutta quanto visto prima per gli *overtopping devices*. Il convertitore presenta due pareti rigide semi-sommerse che si aprono verso il mare con lo scopo di convogliare le onde verso il bacino e di incrementarne l'altezza. Queste due "braccia", che indirizzano l'acqua verso una rampa che conduce al bacino centrale, sono le parti più deboli del dispositivo. Il bacino in questi dispositivi deve essere sufficientemente grande per attenuare le fluttuazioni del livello dell'acqua che si ripercuotono in fluttuazioni di energia generata.

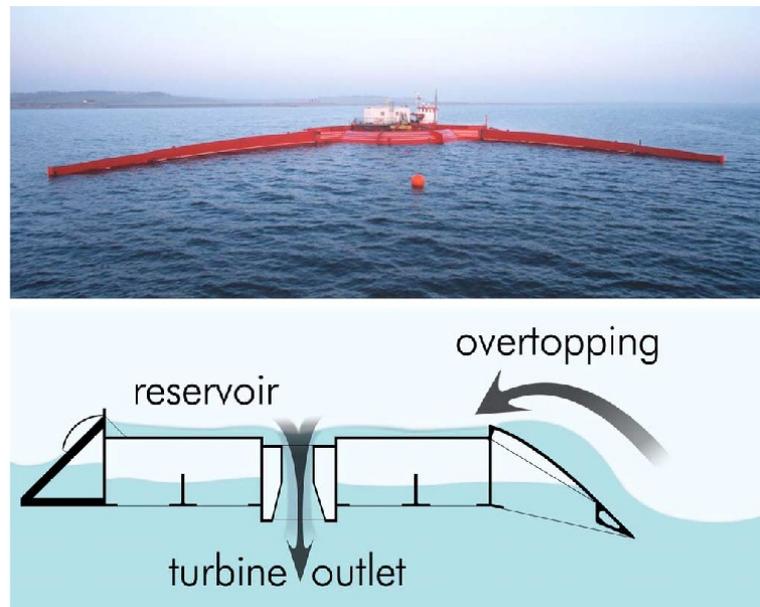


Figura 3.8: *Wave Dragon*: sopra una foto del dispositivo installato e sotto lo schema di principio analogo a quello visto in precedenza per gli *overtopping devices*

Come si legge in [13], un prototipo in scala 1:4,5 (58 m x 33 m con "brac-

cia” di 28 m e un bacino di 55 m³) fu sviluppato nel 2003 a Nissum Bredning in Danimarca. Era equipaggiato di sette turbine da 20 kW l’una che azionavano generatori separati. I test furono soddisfacenti e portarono al collegamento di *Wave Dragon* alla rete elettrica nel 2004. Nel 2005 il dispositivo fu danneggiato in una tempesta che causò la rottura degli ormeggi.

Come per *Pelamis*, il principio su cui si basa *Wave Dragon* non è completamente nuovo. Con esso infatti è portato in mare aperto l’idea alla base di *Tapchan* (nome che sta per Tapered Channel). Tale convertitore sfrutta una piccola baia come bacino, scavata nella scogliera rocciosa (realizzato a Toftstallen in Norvegia nel 1985) [13]. Si osservi il *Tapchan* in figura 3.9. Si può dire che *Wave Dragon* è un *Tapchan* artificiale.

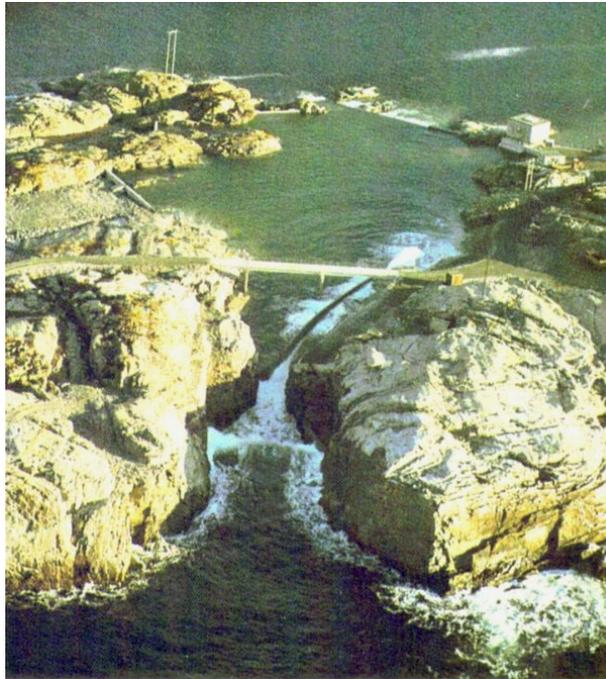


Figura 3.9: *Tapchan* realizzato in Norvegia a Toftstallen nel 1985

3.2.4 *Archimedes Wave Swing* (AWS)

Archimedes Wave Swing è sviluppato da Teamwork Technology (Paesi Bassi). Si tratta di un dispositivo completamente sommerso posto in mare aperto attivato dalle variazioni di pressione causate dalle onde superficiali, quindi sfrutta solo la loro energia potenziale (si veda figura 3.10).

Essenzialmente, l’AWS è una camera d’acciaio a forma cilindrica riempita di aria, il cui coperchio, chiamato *floater*, è un grosso corpo oscillante, mentre la parte inferiore è fissata al fondale. La forza che muove il *floater* è



Figura 3.11: Immagine di un impianto con *Archimedes Wave Swing*

3.2.5 Convertitori oscillanti

I dispositivi posti in mare aperto sono generalmente basati su corpi oscillanti, alcuni posti sulla superficie e altri completamente sommersi. Un semplice dispositivo oscillante è composto da una parte fissa, che viene generalmente posta sul fondo del mare, e da una boa posta sulla superficie del mare che oscilla verticalmente. La boa viene collegata tramite un cavo alla parte fissa e, tramite le sue oscillazioni, aziona un generatore posto all'interno del basamento (figura 3.12). Convertitori di questo tipo sono stati sviluppati ed installati in Danimarca negli anni novanta, più recentemente in Svezia e nell'Oregon (Stati Uniti) nel 2008. Tali dispositivi vengono chiamati *point absorbers* in quanto le dimensioni orizzontali sono molto più piccole della lunghezza d'onda. [6]

Il concetto di un singolo corpo oscillante rispetto ad un corpo fisso sul fondo del mare, come visto in precedenza, può causare alcuni inconvenienti nel caso in cui il livello medio del mare vari, ad esempio a causa delle maree. Si può risolvere il problema introducendo convertitori con più corpi oscillanti, nei quali l'energia viene ricavata sfruttandone il moto relativo. Il prezzo da pagare è nella difficoltà del controllo dei convertitori multi-corpo.

Uno dei convertitori a due corpi oscillanti più interessante è *IPS buoy*, inventato da Sven A. Noren e sviluppato inizialmente in Svezia [6]. Questo consiste in un corpo galleggiante rigidamente connesso ad un tubo completamente sommerso aperto ad entrambe le estremità. Il tubo contiene

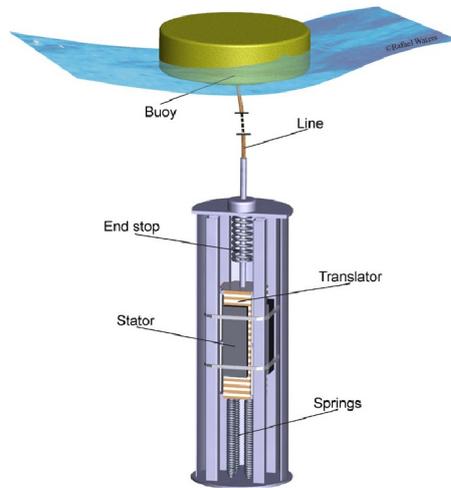


Figura 3.12: Schema di un convertitore a boa realizzato in Svezia

un pistone che viene messo in movimento dal moto relativo tra il tubo ed il galleggiante (figura 3.13). Il movimento è generato dalle onde del mare che fanno oscillare il dispositivo galleggiante rispetto al tubo che possiede un'inerzia maggiore a causa dell'acqua contenuta. Sullo stesso principio di *IPS buoy*, si basa *Aqua BuOY* realizzato da Aqua Energy Group Ltd (USA). Queste unità sono di dimensioni contenute (4 – 5 m), quindi molto affidabili ed economiche.

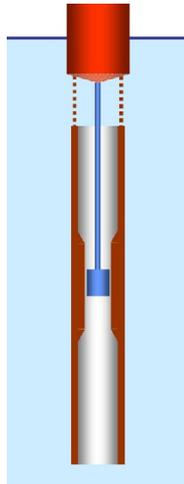


Figura 3.13: Schema di un dispositivo *IPT buoy*

Il convertitore *Frog*, sviluppato dall'Università di Lancaster, in Gran

Bretagna, consiste in un galleggiante posto sulla superficie del mare al quale è attaccata una zavorra sommersa (figura 3.14). Le onde agiscono sulla sottile boa che oscilla attorno ad un asse orizzontale a causa dell'inerzia della zavorra sotto di essa. L'energia è estratta grazie ad una massa che scorre su guide poste sopra alla boa, al di fuori dell'acqua.

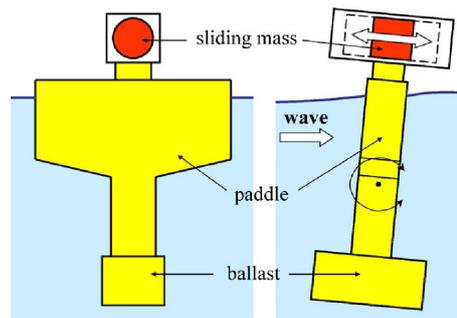


Figura 3.14: Vista frontale e laterale del *PS Frog Mk 5*

Capitolo 4

Impatto ambientale

Le conseguenze ambientali dovute alla realizzazione e installazione di impianti di conversione dell'energia che sfruttano il moto ondoso marino non sono state prese in grossa considerazione finora. I motivi sono legati al fatto che questi dispositivi sono ancora in fase di sviluppo e non molti impianti sono stati realizzati. Tuttavia, con la crescita del numero di progetti e con l'aumento del numero dei test in mare si è iniziato a preoccuparsi anche di un eventuale impatto ambientale. Ogni forma di produzione di energia elettrica ha delle conseguenze sull'ambiente. La percezione del degrado ambientale prodotto dalla conversione dell'energia dalle onde del mare è ridotta rispetto ad altre fonti di energia, soprattutto in relazione alle emissioni atmosferiche. I dispositivi di conversione di energia marina non emettono alcun gas, liquido o solido nell'atmosfera e quindi, in condizioni di normale funzionamento, non sono virtualmente sorgenti di inquinamento, come si legge in [14]. Lo sviluppo di questi convertitori, però, può avere altri impatti di natura ambientale. Alcuni effetti possono essere benefici e altri potenzialmente dannosi.

Per qualsiasi forma di energia rinnovabile è necessario capire bene quali siano i benefici e quali i costi, anche sostenuti dall'ambiente, per confrontare le varie fonti energetiche. La limitata esperienza sull'energia ottenuta dalle onde del mare rende possibile solo la formazione di un quadro di conseguenze possibili che potrebbe risultare incompleto o impreciso. Le conseguenze principali sono riassunte in tabella 4.1 come in [11]. Queste sono conseguenze generiche perché poi si trovano differenze tra siti diversi e tipi di convertitore differenti.

L'impatto delle attività umane sull'ecologia in una zona non sempre si verifica rapidamente e non è facile fare delle previsioni, di conseguenza sono necessari studi a lungo termine. Purtroppo, la conoscenza dell'ecosistema marino è relativamente scarsa rispetto a quelli terrestri e, inoltre, gli studi sugli ambienti marini, specie in mare aperto e in acque profonde, sono in genere molto costosi e richiedono tecnologie subacquee avanzate.

Area	Conseguenze	PA	OWC
Animali	Emissioni subacquee di rumore	x	x
	Emissione di rumore fuori dall'acqua		x
	Incidenti:		
	- collisioni degli animali con i dispositivi	x	x
	- animali intrappolati nella camera		x
	Cambiamenti nella catena alimentare dovuti a cambiamenti ambientali	x	x
	Disturbi della riproduzione e dei sonar mammiferi a causa di campi elettromagnetici e vibrazioni	x	x
	Disturbi alla riproduzione dei pesci a causa di sedimentazione e torbidità dell'acqua	x	xx
	Scogliere artificiali	x	x
	Fauna e fondale marino	Fondali rovinati dal cablaggio e dalle fondamenta	x
Cambiamenti strutturali della sedimentazione		x	xx
Cambiamenti della fauna dovuti ai strati di fondamenta		x	xx
Influenza sulla fauna a causa di campi elettromagnetici		x	xx
Linea di costa	Cambiamento delle correnti e sedimenti per i dispositivi a linea di costa		x
	Decrescita dell'intensità delle onde vicino alla costa a causa di dispositivi <i>offshore</i>	x	x
Impatto visivo	Disturbo per dispositivi fuori dall'acqua		x
Inquinamento	Rischio fughe di olio	x	x
	Macerie da collisioni con imbarcazioni	x	x

Tabella 4.1: Possibili conseguenze ambientali per *point absorber* (PA) e OWC (x = possibile conseguenza, xx = più rischi rispetto agli altri convertitori)

Ora presenteremo con maggiore dettaglio le possibili conseguenze esterne dei convertitori che sfruttano le onde del mare, seguendo le idee trovate in [8, 14].

4.1 Ambito idrodinamico

La conversione di energia dalle onde può avere diversi effetti sulle onde stesse, modificandone le dimensioni e la frequenza, le maree e le correnti di deriva. Una riduzione dell'energia delle onde può influenzare la natura della costa e delle aree in cui l'acqua è bassa. Questo può ripercuotersi sulla fauna e flora acquatica. I dispositivi fissi sono più soliti ad alterare il regime delle onde del mare rispetto ai dispositivi mobili. Le alterazioni possibili al regime delle onde e delle maree possono causare dei cambiamenti nella composizione delle coste e nella sedimentazione.

4.2 Dispositivi come habitat artificiali

La deposizione di rigide fondamenta sul fondo del mare può avere un impatto locale per l'ambiente marino. Durante la fase di installazione del dispositivo, la stesura di fondamenta può lasciare delle particelle libere in sospensione che possono quindi influenzare il comportamento alimentare dei pesci. Uova, alghe e organismi che vivono sul fondo possono venire sepolti e repressi dalla deposizione degli impianti. La quantità e la concentrazione delle particelle sospese possono variare a seconda dell'idrodinamica e della topografia della zona. [8]

Una volta installati i dispositivi questi potranno diventare nuovi habitat per diverse specie marine. I convertitori potranno fornire superfici di fissaggio per una varietà di alghe e di invertebrati e, in questo modo, i convertitori di energia del moto ondoso saranno colonizzati da organismi. Il fatto che le nuove strutture possano essere attraenti per gli organismi marini diventa un onere tecnico; questo fenomeno è conosciuto con il nome di *biofouling*. Dal punto di vista biologico tutto questo può essere positivo, ma viene pagato in termini di manutenzione, soprattutto per i dispositivi posti in mare aperto. È inevitabile che misure anti-insediamento siano necessarie, qualora per esempio, gli organismi possano causare corrosione o intralcio per l'ispezione e la manutenzione.[14] Misure specifiche per convertitori di energia sono ancora da sviluppare, ma queste potrebbero includere l'uso di vernici antivegetative o iniezione diretta di biocidi. L'uso di alcune vernici antivegetative, tuttavia, dovrebbe essere evitato in quanto alcune possono contenere metalli come il piombo e il rame e quindi inquinare. Incrostazioni di condotti, a causa dell'acqua di mare, presso le centrali costiere, vengono controllate con l'iniezione o la generazione elettrolitica di cloro. A causa della diluizione non è chiaro se l'uso di queste misure in mare aperto possa essere dannoso per l'ambiente. Certamente effetti negativi possono aver luogo se il cloro viene fatto reagire per formare composti organici clorurati che tendono al bioaccumulo e persistono nell'ambiente, anche se questo sembra essere improbabile in acque aperte.

Un altro aspetto importante è capire se il *biofouling* sia un male per l'efficienza degli impianti di conversione dell'energia. L'incrostazione contribuisce alla ricchezza e alla diversità delle specie e ha, quindi, un effetto ecologico positivo. Ma può avere effetti negativi in termini di efficienza, soprattutto su dispositivi più fragili come quelle basati su boe. Questi organismi, infatti, possono alterare il peso e la forma delle boe e quindi la loro efficacia. La quantificazione delle incrostazioni biologiche è stata fatta all'interno del progetto Lysekil, durante l'estate del 2005 e del 2006 in Svezia, in un impianto costituito da *point absorber*. Le stime sulla quantità di biomassa che può attaccarsi ad una boa del convertitore indicano fino a 150 kg di biomassa aggiunta per una boa di 3 m di diametro [8]. In un grande parco di migliaia di boe questo potrebbe essere un problema. Il modello di calcolo può essere utilizzato per modificare la forma delle boe, e indica che il *biofouling* potrebbe anche non avere alcun impatto negativo sulla forza di sollevamento di una boa. Così, la soluzione più semplice ed economica sembrerebbe quella di non ostacolare le incrostazioni e dimensionare i dispositivi cercando di tener conto di questo fenomeno.

4.3 Rumore ed effetti elettromagnetici

Un altro argomento che è diventato molto discusso negli ultimi anni è quello riguardante il rumore subacqueo, come si legge in [8]. Alcuni convertitori sembrano essere molto rumorosi, soprattutto in condizioni di mare mosso. Il rumore si trasmette su lunghe distanze sott'acqua e questo può avere delle conseguenze per la navigazione e per i sistemi di comunicazione di alcuni animali, come foche, delfini e balene. Oltre a questi, il rumore può disturbare anche diverse specie di pesci. Diversi animali (cetacei, pinnipedi, teleostei, crostacei) utilizzano i suoni subacquei per l'interazione, come la comunicazione, ricerca di prede e eco-localizzazione, trovare i compagni ed evitare i predatori. La produzione di rumore durante l'installazione (ad esempio: perforazioni, posa di cavi, traffico delle barche) può danneggiare il sistema acustico degli animali. Queste sono solo possibili conseguenze, perché in realtà si sa poco circa gli effetti a lungo termine del rumore sugli individui e sulle popolazioni marine. Chiaramente, si dovranno tenere in considerazione i problemi relativi alla sopravvivenza durante la realizzazione degli impianti di conversione dell'energia.

Il problema del rumore subacqueo non riguarda solo la fase di installazione, ma potrebbe riguardare anche il normale funzionamento, soprattutto se si parla di grossi impianti. Il rumore potrebbe risultare dannoso per gli aspetti fisici e comportamentali delle specie acquatiche. Si sa poco riguardo all'inquinamento acustico prodotto dai convertitori in quanto non si dispone di cifre esatte però alcuni studi sono stati fatti, soprattutto con simulazioni

e test di laboratorio [12]. Dalla stessa fonte, si capisce che le incertezze sul problema emergono da:

- timbri (suoni) prodotti dai WEC;
- interazione sonora tra i convertitori e l'acqua;
- propagazione del suono nell'oceano;
- conoscenza delle specie marine nel sito di installazione;
- audiogramma per queste specie;
- conseguenze del rumore sulle specie;
- impatto del rumore sull'ecosistema marino complessivo.

Il rumore complessivo prodotto da un convertitore deriva da molte sorgenti e componenti differenti all'interno allo stesso dispositivo. Un impianto energetico comprende molti convertitori al suo interno: questo può causare un incremento del rumore prodotto o, in alcuni casi particolari, l'annullamento dei suoni per alcune gamme di frequenze [12]. Per poter prevedere questi fenomeni è necessario conoscere bene le condizioni dell'oceano (temperatura, salinità, pressione e sedimentazione) e il timbro (spettro di frequenze) dei suoni prodotti. Ogni convertitore può presentare un timbro sonoro diverso che può essere determinato da diversi fattori quali i componenti meccanici (turbine, generatori, pompe, cilindri, ecc.), cavità, vibrazioni e dal fatto che l'acqua e le onde colpiscono il dispositivo.

Un'altra possibile conseguenza dei convertitori di energia che sfruttano le onde del mare è legata ai campi elettromagnetici prodotti dai dispositivi. Alcuni animali marini, come pesci migratori, elasmobranchi, cheloni, crostacei e mammiferi marini sfruttano il campo magnetico della Terra per la navigazione, come si legge in [8]. Alcuni studi sono stati fatti esponendo alcune specie di organismi marini a campi magnetici stazionari per lunghi periodi, ma non sono stati riscontrati effetti sulla sopravvivenza o sulla riproduzione di questi. I pesci sembrano non essere influenzati in misura significativa da campi elettromagnetici prodotti dalla conversione energetica o dalla trasmissione lungo cavi sottomarini. Non si sa ancora se le specie più sensibili possano venire attratte o respinte da campi elettromagnetici e se i loro comportamenti possono essere modificati. Con l'uso di tecniche particolari, i campi elettromagnetici prodotti dai cavi possono risultare predominanti rispetto al campo terrestre solo a pochi decimetri dai cavi stessi. Il problema sembra quindi risolvibile interrando i cavi elettrici nel fondale marino.

4.4 Aree vietate e barriere artificiali

La conversione dell'energia dalle onde del mare o dalle maree, indipendentemente dalla tecnologia, può intralciare la pesca commerciale, in particolare quella con reti, soprattutto nel caso di grossi impianti posti in mare aperto. Zone interdette alla pesca vengono richieste in continuazione da parte di ecologisti dato che molti mari vengono sfruttati, quindi una totale cessazione della pesca commerciale in queste zone potrebbe portare delle conseguenze positive. In questo modo grandi impianti energetici potrebbero incrementare la popolazione marina, quasi allo stesso modo delle zone protette oggi esistenti. Infatti, si sa che le aree protette portano benefici anche alle zone adiacenti.

Una volta installati i convertitori in mare, questi funzioneranno come delle scogliere artificiali. Le strutture possono diventare attrattive per numerose specie di animali, come già visto con il fenomeno del *biofouling* in sezione 4.2, ma possono anche alterare il regime delle correnti e delle maree. In tal modo si possono avere delle ripercussioni sulla distribuzione dei nuovi strati sedimentari e sull'accumulo di materiale organico. Le barriere artificiali possono portare a cambiamenti biologici, che potrebbero incrementare il numero di animali e piante acquatiche. Potrebbero comparire specie insolite in tali zone, come ad esempio predatori e parassiti che altrimenti non ci sarebbero. Risulta importante quindi capire se le nuove strutture sono benefiche per le specie indigene esistenti o se attraggono specie non indigene e quindi alterano la composizione dell'ecosistema. [8]

Una considerazione doverosa va fatta su cosa ne sarà degli impianti alla fine della loro vita lavorativa. Lasciare i dispositivi montati all'erosione naturale o ridurli in macerie sul fondo del mare causerebbe un'alterazione permanente per l'ambiente vicino; diventerebbero in effetti delle scogliere. La costruzione di barriere artificiali per aumentare la diversità degli habitat dei fondali marini e attrarre pesci è una tecnica ampiamente utilizzata a livello mondiale. La diversità non è sempre un attributo per valutare la conservazione dell'ecosistema marino di una zona e l'influenza di barriere artificiali sulla popolazione marina può essere imprevedibile e diversa da specie a specie. Tuttavia, l'influenza ambientale di tali barriere sembra essere positiva, purché esse non siano situate in zone ecologicamente sensibili o importanti. [14]

4.5 Migrazioni

I progetti di centrali eoliche generalmente si concentrano sui possibili effetti su uccelli e pipistrelli, in quanto possono intralciare i loro percorsi migratori e presentare rischi di collisione. Gli uccelli marini tendono a raccogliersi attorno alle piattaforme petrolifere e impianti marini in numero

elevato a causa dell'accumulo di cibo e per l'illuminazione notturna [8]. Una situazione diversa si ha per i dispositivi posti sulla costa in prossimità di luoghi di cova, che possono intralciare i processi di nidificazione o distruggere le zone di alimentazione per gli uccelli.

I dispositivi non dovranno interrompere o intralciare i percorsi migratori delle varie specie, perché si ricordi che le centrali possono estendersi anche per molti chilometri. Grandi aree coperte, ad esempio da boe, possono diventare delle barriere, soprattutto per le specie migratorie. Purtroppo, si sa poco dei passaggi che i pesci o i mammiferi marini utilizzano per la migrazione; il tutto è aggravato dal fatto che questi percorsi possono essere irregolari e imprevedibili, in quanto suscettibili alle correnti, ad esempio, alla stagione, al clima regionale e locale e alla disposizione delle risorse alimentari. Eppure, questa sarà una questione che richiederà probabilmente diversi tentativi prima di trovare delle risposte in termini di locazioni adeguate per gli impianti energetici. [8]

4.6 Emissioni

Diversamente dalle fonti di energia fossile, l'energia prodotta sfruttando il moto ondoso non produce gas che aggravano l'effetto serra o altri inquinanti atmosferici. Tuttavia emissioni ed inquinanti vengono prodotti durante la fase di costruzione ed installazione dei dispositivi. Le emissioni in questi casi vanno comunque valutate se si vuole eseguire un confronto dettagliato con le altre fonti di energia rinnovabile. [14]

4.7 Altre possibili conseguenze

Analizziamo alcune conseguenze secondarie come fatto in [14].

Conversione e trasmissione dell'energia

Linee di trasmissione dell'energia sono necessarie per questi dispositivi. Inizialmente le linee sono poste sul fondale marino ma poi, quando escono dal mare, si preferisce usare linee aeree. Infatti, si tende ad evitare di installare cavi sotterranei anche qualora fosse possibile per via della conformazione della costa, in quanto più costosi e di difficile accesso e manutenzione. Queste linee di trasmissione sospese possono rovinare le viste e i panorami.

In casi in cui la costa sia popolata di uccelli acquatici, le linee di trasmissione aeree possono avere effetti sulla mortalità di certe specie, specialmente di quelle migratorie con limitata maneggevolezza. Infatti molte collisioni possono avvenire quando le linee intralciano le vie tra i luoghi di nidificazione e i posti in cui gli uccelli si cibano.

Rischi per la navigazione

I dispositivi di energia possono essere potenziali pericoli per la navigazione, in quanto possono risultare difficili da rilevare visivamente o dal radar. Modalità di registrazione delle posizioni dei dispositivi assieme alla segnalazione tramite luci e transponder consente di ridurre al minimo questo rischio.

Effetti visivi

In alcune aree la profondità del mare impone l'installazione dei dispositivi abbastanza vicino alla costa. Tali impianti possono quindi avere un impatto visivo negativo.

Costruzione dei dispositivi

Altri maggiori effetti sull'ambiente possono essere causati dallo sviluppo, dalla creazione e dalla manutenzione di questi impianti energetici. Questi aspetti devono essere tenuti in conto in un'eventuale valutazione dell'impatto ambientale dei convertitori.

Capitolo 5

Pelamis

Questo convertitore di energia del moto ondoso, già introdotto in sezione 3.2.2, sarà ora descritto con maggior dettaglio, dando importanza alla conversione energetica, all'impatto ambientale e ai vari progetti attuali. Si è scelto di sviluppare questo argomento in quanto *Pelamis* è un convertitore di ultima generazione molto recente, già prodotto e commercializzato dalla ditta di Edimburgo, Ocean Power Delivery Ltd [1].

Pelamis è un dispositivo che viene posto in mare aperto (*offshore device*), per poter sfruttare i più grandi contenuti energetici delle onde, e si presta all'installazione di impianti costituiti da più dispositivi. Attualmente, con i suoi 150 m di lunghezza, 3,5 m di diametro e 700 tonnellate di peso, può arrivare a produrre 750 kW (potenza nominale). Sempre sul sito del produttore [1], viene indicata una produzione energetica annua media pari al 25-40% della potenza nominale, dato che dipende comunque dalle condizioni del mare. Ha la forma di un lungo serpentone galleggiante che viene mantenuto quasi parallelo alla direzione delle onde tramite ormeggi non rigidi, come si può osservare nella parte alta di figura 5.1. Questo dispositivo va installato in acque profonde tra i 50 m e i 70 m e tra i 5 e i 10 km di distanza dalla riva. È pensato per essere installato in impianti che comprendono più convertitori connessi tra di loro e collegati al fondale marino da un solo cavo di ancoraggio [15]; un impianto che copre 1 km² di mare può arrivare a produrre 30 MW di energia, per soddisfare il fabbisogno energetico di 20 000 abitazioni.

Il meccanismo attraverso il quale l'energia viene trasferita dalle onde del mare al dispositivo prende il nome di *power take-off* (PTO). Nella realizzazione di un convertitore di energia si deve fare in modo che il dispositivo non venga danneggiato e possa funzionare anche in condizioni difficili. Inoltre, la realizzazione cerca di far assorbire e convertire una quantità sempre maggiore di energia. Questi obiettivi sono in larga parte ottenibili attraverso il controllo del PTO [7].

Per ottenere il massimo assorbimento energetico, un dispositivo WEC

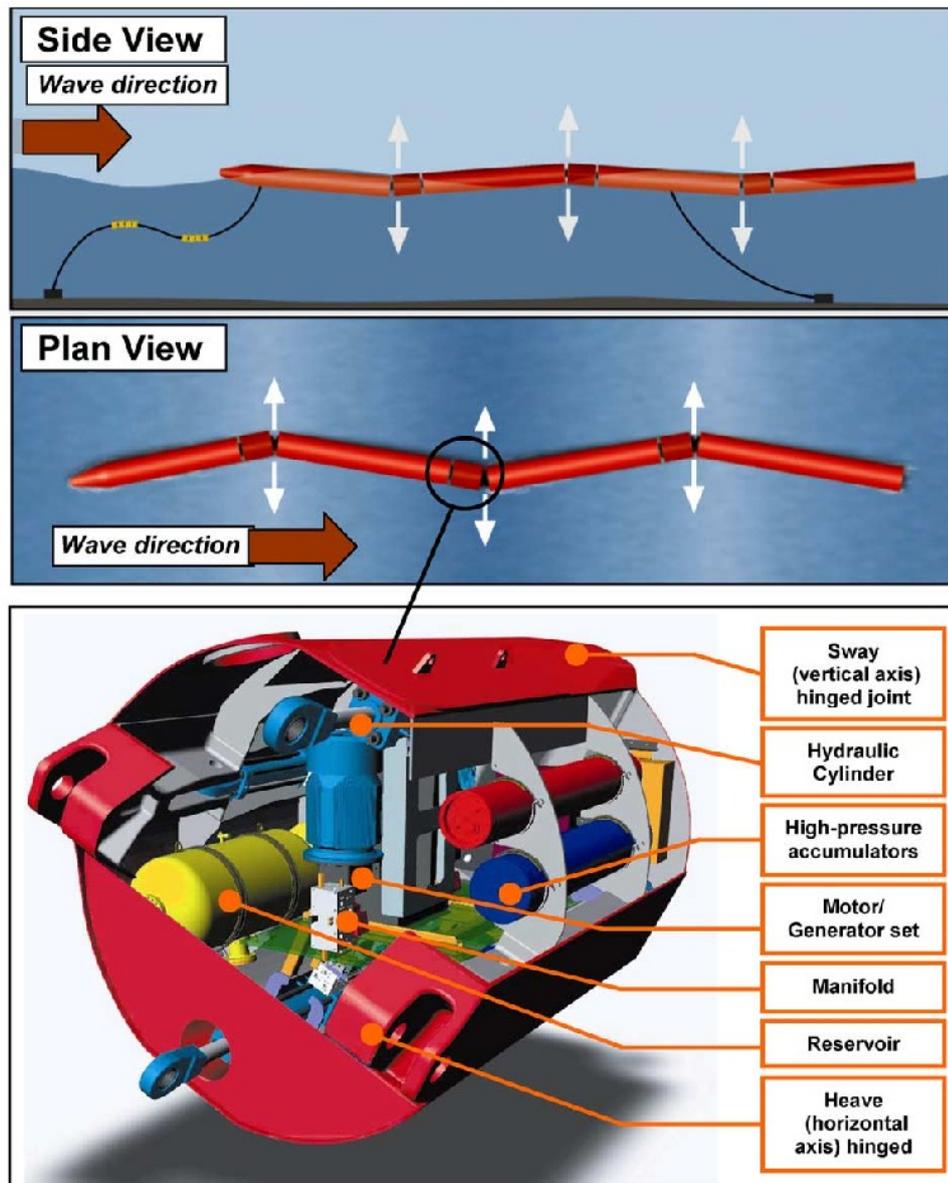


Figura 5.1: In alto è possibile osservare come viene installato *Pelamis* sulla superficie del mare. In basso è presentata una sezione di un'articolazione del convertitore

deve rispondere in condizione di risonanza con la frequenza delle onde, in modo tale da mantenere in fase la forza di eccitazione e la velocità di risposta [4, 6, 7]. Con un'appropriata realizzazione è possibile fare in modo che la frequenza propria di risposta di un convertitore sia nel giusto range

di frequenze che troverà in una specifica situazione. Tuttavia, il controllo in retroazione del PTO è necessario poiché le onde del mare sono date dalla sovrapposizione di onde di diverse frequenze e che in generale possono variare.

5.1 PTO del Pelamis

Riprendendo quanto già detto in 3.2.2, il movimento relativo tra i suoi quattro corpi cilindrici collegati da articolazioni mobili consente a *Pelamis* la conversione dell'energia delle onde in energia elettrica. Vengono sfruttati principi idraulici per la conversione energetica, in quanto l'idraulica gioca un ruolo fondamentale quando si sviluppano forze elevate ma a velocità ridotte. Questa, inoltre, consente un accumulo energetico a breve termine con costi ridotti sfruttando accumulatori a gas ad alta pressione. Si ricordi che l'accumulo energetico aiuta a migliorare la qualità della potenza rilasciata in rete.

Le articolazioni di *Pelamis* presentano due gradi di libertà e vengono messe in movimento dalle onde incidenti. Il PTO reagisce al movimento angolare tra le articolazioni e consiste di un set di cilindri idraulici e una pompa idraulica. Tramite questi viene pompato dell'olio che immagazzina l'energia in accumulatori di gas ad alta pressione [15]. Dei motori idraulici sfruttano l'alta pressione di questi gas per produrre energia elettrica che sarà fornita alla rete da dei generatori elettrici. Una sezione di un'articolazione del dispositivo è visibile in basso nella figura 5.1. La conversione energetica di *Pelamis* può essere studiata in due parti separate. La prima fase di trasmissione energetica, che comprende i cilindri idraulici e i loro controlli, converte l'energia delle onde e la accumula in gas ad alta pressione. La seconda parte, che consiste di motori idraulici collegati ai generatori elettrici, converte l'energia accumulata in elettricità trasmessa alla rete. Uno schema del convertitore è presentato in figura 5.2.

Per ottimizzare l'assorbimento energetico, il PTO dovrà essere in grado di regolare la forza applicata dalle onde incidenti fornendo un'adeguata resistenza che deve regolarsi in base alle condizioni del mare. Il dispositivo dovrà pertanto eseguire delle misurazioni continue per poter controllare al meglio il PTO. Questo permetterà l'adattamento alle condizioni del mare: in mari poco mossi l'energia assorbita dovrà essere massimizzata, mentre in mari mossi questa dovrà essere ridotta per ridurre il rischio di danneggiamenti. Questo viene fatto attraverso la resistenza che i cilindri oppongono alla forza impressa dalle onde del mare. Un controllo in tempo reale viene fatto attraverso delle valvole azionate elettronicamente per regolare la giusta rigidità delle articolazioni e quindi regolare la giusta frequenza delle oscillazioni delle articolazioni. Queste valvole elettroniche non fanno altro che controllare il flusso che dai pistoni va agli accumulatori a gas. [7, 15]

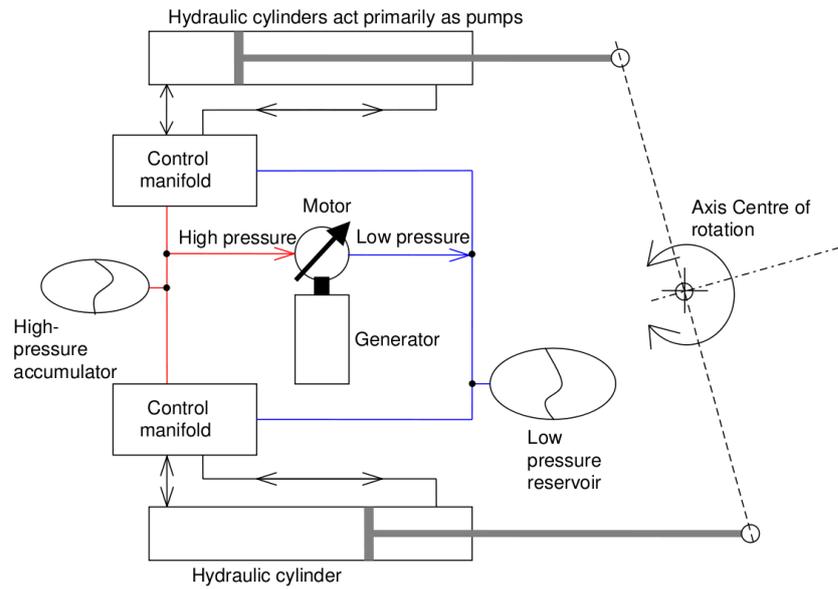


Figura 5.2: Schema della conversione energetica all'interno di *Pelamis*

Nel *power take-off* del *Pelamis*, se una camera pressurizzata scambia fluido direttamente con gli accumulatori le uniche inefficienze e perdite sono associate alla compressione e alle frizioni sulle guarnizioni dei cilindri idraulici. Un'attenta progettazione può contenere queste perdite al di sotto del 20% su una larga fascia di condizioni operative, come detto in [7].

In tabella 5.1 sono riportate alcune specifiche del convertitore *Pelamis* ricavate dal sito del produttore [1].

Struttura	Lunghezza complessiva	150 m
	Diametro	3,5 m
	Peso	700 tonnellate (zavorra inclusa)
	Conversione energetica	3 unità indipendenti di conversione
Unità per la conversione energetica	PTO	4 pistoni idraulici per articolazione
	Velocità dei pistoni	0 – 0,1 m/s
	Immagazzinamento/ regolazione potenza	Accumulatori ad alta pressione
	Pressione di funzionamento	100 – 350 bar
	Generatore	2 x 157 kVA / 125 kW
	Velocità	1500 rpm
Potenza	Potenza complessiva	150 kW
	Energia prodotta in un anno	2,7 GW h
	Potenza massima delle onde	55 kW/m
	Limitazioni della potenza	in caso di onde più alte di 6 – 7 m
	Tipo di generatori	asincroni
	Tensione	trifase, 415/690 V _{ac} , 50/60 Hz
	Trasformatore	950 kVA portati a 11 kV o 33 kV
Luogo di installazione	Profondità acqua	> 50 m
	Corrente	< 0,5 m/s
Confronti	Equivalenza con le turbine a gas - combustibile	600 tonnellate/anno
	Equivalenza con le turbine a gas - emissioni di CO ₂	2000 tonnellate/anno

Tabella 5.1: Specifiche di *Pelamis* tratte da [1]

In tabella 5.2 si possono osservare le potenze prodotte da un'unità *Pelamis* per diverse condizioni del mare.

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

Tabella 5.2: Matrice della potenza generata in kW da *Pelamis* per varie condizioni del mare (differenti altezze d'onda e periodi) [5]

5.2 Impatto ambientale

Descriviamo brevemente le conseguenze ambientali dei dispositivi *Pelamis* alla luce di quanto già visto nel capitolo 4. [1]

Rumore

Neppure per *Pelamis*, come già detto nella sezione 4.3, il problema del rumore è ben noto, tuttavia l'interesse per questo problema sta crescendo. Vediamo delle cause di rumore prodotto dal dispositivo:

- le imbarcazioni utilizzate per rimorchiare i dispositivi sono una grossa sorgente di rumore, però queste vengono utilizzate solo durante una breve fase di installazione;
- i movimenti di *Pelamis* sono abbastanza lenti e di breve escursione; sono caratterizzati da energie sonore emesse basse;
- i processi energetici, ad esempio il movimento dei motori (rotazione a 1 500 rpm) e dei generatori, producono rumori di circa 70 – 80 dB alla distanza di un metro nell'aria.

Effetti sull'ecosistema marino

Gli ormeggi e la loro installazione possono causare dei disturbi alle specie locali durante l'installazione. Un'eventuale rimozione del dispositivo risulterebbe davvero semplice evitando gli effetti delle scogliere artificiali viste nella sezione 4.4. Il problema del *biofouling*, analizzato nella sezione 4.2, viene minimizzato con *Pelamis* in quanto le superfici esposte all'incrostazione sono ridotte.

I pesci tendono a concentrarsi attorno agli oggetti che si ergono dal fondale marino, come scogliere rocciose o strutture realizzate dall'uomo. I convertitori e gli ormeggi quindi tenderanno ad attrarre i pesci, fornendo riparo dalle attività di pesca e incrementando alcune specie marine indigene.

Impatto visivo

Questi dispositivi emergono dalla superficie del mare per circa il 50% del loro diametro, ovvero per circa 2 m. Per essere avvistati dalle imbarcazioni, sono equipaggiati di lampeggianti che possono essere visti di notte fino da due miglia nautiche di distanza.

Impatto sulla costa

I convertitori estraggono una piccola percentuale dell'energia trasportata dalle onde, per cui possono esserci ridottissime variazioni sul regime delle

onde che si dirigono verso la costa (ad esempio: cambiamento dell'intensità o della direzione delle onde). Gli effetti di modificazione dell'ambiente costiero sono quindi davvero contenuti.

5.3 Dispositivi installati

Come si legge in [1], la ditta Power Delivery Ltd ha realizzato alcuni impianti basati su *Pelamis*, alcuni installati altri in fase di sviluppo.

Il primo impianto è stato installato a 5 km a largo della costa portoghese settentrionale, ad Aguçadoura. Esso rappresenta la prima centrale al mondo che possiede più dispositivi e rappresenta il primo ordine di natura commerciale. Con le sue tre unità *Pelamis* da 750 kW l'una, la centrale è caratterizzata da una potenza nominale complessiva di 2,25 MW. Investimenti futuri potrebbero portare all'ampliamento dell'impianto fino a raggiungere un potenza di 20 MW. La centrale è già connessa e fornisce energia alla rete elettrica, ma è ancora oggetto di lavori di sviluppo.

Un impianto costituito di un solo dispositivo è in fase di costruzione e verrà installato a 2 km a ovest di Orkney, nella Scozia settentrionale. L'impianto potrà fornire 750 kW, ma è costituito da un modello di convertitore successivo a quello installato in Portogallo.

In fase di sviluppo è, invece, un grosso impianto da 20 MW che sarà installato a ovest delle isole Shetland, ancora nel Regno Unito (a nord della Scozia). L'impianto comprende 26 dispositivi *Pelamis* di seconda generazione, come quello installato a Orkney.

Un ultimo progetto, ancora allo stadio iniziale, potrebbe prevedere l'installazione di quattro convertitori sempre nel Regno Unito per ottenere un impianto da 3 MW.

Conclusioni

L'utilizzo di fonti di energia rinnovabile sta diventando sempre più essenziale per sostenere il fabbisogno energetico del nostro pianeta, per contenere l'effetto serra e per ridurre il consumo di risorse disponibili in misura limitata. Questa tesina ha illustrato una fonte di energia rinnovabile poco nota e poco sfruttata al giorno d'oggi. Ricerche e risultati sperimentali hanno indicato che questa fonte energetica è adatta per la produzione in larga scala di energia; il costo effettivo per l'installazione di impianti e per la produzione energetica rendono questa fonte di energia una valida alternativa ai combustibili fossili.

A differenza di altri tipi di energie rinnovabili, la situazione attuale mostra un'un'ampia varietà di sistemi di conversione dell'energia del moto ondoso, in diverse fasi di sviluppo. Tutte le varie tecnologie sono in competizione le une contro le altre e appare poco chiaro quale prevarrà. Negli ultimi quindici anni, la maggior parte delle attività di ricerca e sviluppo in questo settore ha avuto luogo in Europa, in gran parte per il sostegno finanziario e il coordinamento fornito dalla Commissione Europea e per l'atteggiamento positivo adottato da alcuni governi europei. Recentemente, l'interesse per l'utilizzo di energia delle onde del mare è cresciuto rapidamente anche in altre parti del mondo.

Robustezza, affidabilità e convenienza sono gli obiettivi più importanti che dovranno essere raggiunti nelle ricerche dei prossimi anni. Stime accurate delle risorse energetiche delle onde sono importanti per l'effettivo funzionamento dei dispositivi in termini di controllo, affidabilità e fornitura di energia alla rete. Una migliore comprensione dell'interazione tra le risorse ed il dispositivo consentiranno di giungere a realizzazioni di convertitori ottimali.

Altro punto da sviluppare è quello relativo all'impatto ambientale di questi convertitori energetici. Questo deve essere pienamente analizzato e quantificato per garantire che non ci siano ostacoli alla diffusione su vasta scala dei dispositivi che sfruttano il moto ondoso per la produzione di energia elettrica.

Bibliografia

- [1] Sito web di Power Delivery Ltd, produttore di *Pelamis*, Febbraio 2010. <http://www.pelamiswave.com/>.
- [2] John Andrews e Nick Jelley. *Energy Science: Principles, Technologies, and Impacts*, capitolo 4 : Hydropower, tidal power, and wave power. Oxford University Press, 2007.
- [3] Richard Boud. *Wave and marine current energy - Status and research and development priorities*. IEA OES, 2003.
- [4] Ted K. A. Brekken, Annette Von Jouanne, e Hai Yue Han. Ocean Wave Energy Overview and Research at Oregon State University. *Power Electronics and Machines in Wind Applications*, 2009.
- [5] G.J. Dalton, R. Alcorn, e T. Lewis. Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America. *Renewable Energy*, 35(2):443 – 455, 2010.
- [6] António F. de O. Falcão. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3):899 – 918, 2010.
- [7] Ross Henderson. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. *Renewable Energy*, 31(2):271 – 283, 2006. Marine Energy.
- [8] Olivia Langhamer, Kalle Haikonen, e Jan Sundberg. Wave power - Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4):1329 – 1335, 2010.
- [9] Mats Leijon, Annika Skoglund, Rafael Waters, Alf Rehn, e Marcus Lindahl. On the physics of power, energy and economics of renewable electric energy sources - Part I. *Renewable Energy*, In Press, Corrected Proof, 2009.
- [10] Paolo Mazzoldi, Massimo Nigro, e Cesare Voci. *Fisica Volume II*, capitolo 12 : Fenomeni ondulatori. Edises, 2000.

- [11] A. Muetze e J. G. Vining. Ocean wave energy conversion - a survey. *Industry Applications Conference - 41st IAS Annual Meeting*, 2006.
- [12] Sofia Patrício, André Moura, e Teresa Simas. Wave energy and underwater noise: State of art and uncertainties. *Oceans 2009 - Europe*, 2009.
- [13] Henk Polinder e Mattia Scuotto. Wave energy converters and their impact on power systems. *International Conference on Future Power Systems*, 2005.
- [14] T. W. Thorpe. A brief review of wave energy - A report produced for The UK Department of Trade and Industry. 1999.
- [15] R. W. Yemm, R. M. Henderson, e C. A. E. Taylor. The OPD Pelamis WEC: Current Status and Onward Programme. *Proc. 4th European Wave Energy Conference, Alborg Denmark*, 2000.