

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

Corso di Laurea Triennale in INGEGNERIA GESTIONALE

Tesi di Laurea

L'Italia una penisola nel Mediterraneo,
alla scoperta del potenziale energetico del
"Mare Nostrum"

RELATORE: Prof. Mirto Mozzon

Dottor. Augusto Tassan

LAUREANDO: Sig. Francesco D'Elia

Anna Accademico 2015-2016

INDICE

Sommario.....	I
INTRODUZIONE.....	3
CAP.1 Cenni storici sull’Energia da moto ondoso	10
CAP.2 La Fisica e il mare.....	15
CAP.3 Caratteristiche delle onde reali	23
CAP.4 Potenziale energetico nel Mondo e in Italia	27
CAP.5 Classificazione delle principali tecnologie.....	32
CAP.6 Relazioni di funzionamento.....	43
CAP.7 Ricavare energia dalle onde	44
CAP.8 Tecnologie in uso nel mondo	46
CAP.9 Un esempio di installazione in Italia.....	49
CAP.10 L’impatto ambientale in generale	61
CAP.11 Fattori di stress ambientale	61
Conclusioni personali.....	68
Bibliografia	72
Sitografia	74

INTRODUZIONE

Si definiscono Fonti energetiche tutte quelle sorgenti di energia che sono a disposizione del genere umano e che possono essere trasformate allo scopo di eseguire un lavoro oppure per produrre calore. Qualunque organismo ha bisogno di energia per vivere. L'energia, infatti, è legata a tutte le attività compiute dall'uomo: quando pensiamo o ci muoviamo utilizziamo l'energia immagazzinata nel nostro corpo. Tutti gli oggetti che ci circondano o di cui facciamo uso, hanno bisogno di energia per funzionare o ne hanno avuto bisogno per essere costruiti. L'energia illumina e riscalda, permette gli spostamenti, alimenta gli strumenti di cui ci serviamo per vivere.

Il Sole è la principale fonte di energia della Terra, la quale riceve dalla sua Stella un flusso ininterrotto di energia sotto forma di radiazioni solari che, oltre ad alimentare tutti i processi vitali, vegetali e animali, favorisce il ciclo dell'acqua tra specchi d'acqua ed atmosfera e produce i venti. L'energia solare, inoltre, fa crescere le piante che, nel corso di milioni di anni, si trasformano (insieme ai resti di organismi animali) in combustibili fossili, petrolio, carbone e gas naturale. In altre parole, tutta l'energia disponibile sul nostro pianeta deriva direttamente o indirettamente dal Sole, e ovvi esempi sono l'energia fotovoltaica, l'energia idrica, l'energia eolica, l'energia chimica dei combustibili fossili (carbone, petrolio e gas naturale) e l'energia delle biomasse (per esempio la legna). Anche l'energia delle onde del mare deriva dal Sole, perché è dai campi gravitazionali che si instaurano tra il Sole, la Luna e la Terra che deriva l'energia delle maree ed è grazie ai forti venti che soffiano sulla superficie degli specchi d'acqua che si formano le onde. Risalgono, invece, alla formazione della Terra, l'energia geotermica e quella nucleare (esse quindi non derivano dalle trasformazioni successive dell'energia del Sole).

Le Fonti energetiche ad oggi conosciute possono essere classificate in diversi modi. Esse si dicono primarie se sono utilizzabili direttamente, così come si trovano in natura. Sono fonti primarie di energia: il carbone, il petrolio, il gas naturale, la legna, i combustibili nucleari (come Uranio), il Sole, il vento, le maree, le onde, le correnti, i laghi montani e i fiumi (da cui è possibile ottenere energia idroelettrica) e il calore della Crosta terrestre che fornisce energia geotermica. Sono secondarie quelle che derivano dalla trasformazione delle fonti primarie di energia: ad esempio, la benzina (che deriva dal trattamento del

petrolio grezzo) e l'energia elettrica (ottenuta dalla conversione di energia meccanica attraverso delle centrali elettriche).

Le Fonti energetiche vengono classificate anche in: rinnovabili e non rinnovabili. Alcune fonti vengono dette rinnovabili o “alternative” perché forniscono un'energia che si rigenera in continuazione mediante delle trasformazioni chimiche (come le biomasse) o fisiche (come l'energia idrica, solare, eolica, ecc...). In particolare il Sole, il vento, l'acqua, le maree, le onde, le correnti e il calore della Terra sono Fonti inesauribili anche a lungo termine, dato che godono di una disponibilità illimitata in natura. Le biomasse, invece, sono fonti di energia esauribili ma in grado di rigenerarsi in tempi confrontabili con quelli della vita dell'uomo.

Le cosiddette fonti non rinnovabili, invece, hanno tempi di rigenerazione talmente lunghi (milioni di anni) che una volta sfruttate si possono considerare esaurite. È questo il caso dei combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale) o l'uranio. La disponibilità di tali Fonti energetiche, per quanto grande, è pur sempre limitata ed esse costituiscono una sorta di magazzino energetico della Terra.

Nella preistoria, e per gran parte della storia umana, le fonti di energia più utilizzate dall'uomo furono: la forza muscolare umana e quella animale che ovviamente venivano convertite in lavoro, mentre la combustione del legno o delle biomasse in generale, veniva sfruttata per la “produzione” di calore. Più tardi la navigazione a vela, così come l'innovazione dei mulini ad acqua o a vento (per la macinazione del grano) rappresentarono una prima diversificazione nello sfruttamento delle fonti energetiche da parte dell'uomo. La densità di energia per persona tuttavia, prima del XVIII secolo in Occidente, era assai ridotta: questo si traduceva, nelle società preindustriali, in una minore mobilità delle persone, in una minore circolazione di merci e nella discontinua disponibilità di risorse alimentari. Nel XX secolo, con l'avvento della Seconda Rivoluzione industriale, il consumo di combustibili fossili subì un vertiginoso aumento rispetto a quanto, invece, era accaduto nel '700 in Europa con la Prima Rivoluzione industriale. Il Fabbisogno energetico crebbe in un primo momento lentamente poi cominciò a seguire un andamento esponenziale, raddoppiando in soli trent'anni, ovvero tra il 1920 e il 1950, o addirittura quadruplicando nel ventennio successivo, fino al 1970. Fino alla prima metà del 1800, l'umanità intera, però, poté accedere ad una quantità praticamente sconfinata (ma non infinita) di riserve di Energia fossile. Col passare degli anni e con la continua crescita dello sviluppo industriale, già verso la fine degli anni '70 si cominciò a

evidenziare una prima scarsità di risorse di energia fossili e ci si rese conto che la situazione sarebbe degenerata drasticamente nel giro di non molti decenni, una volta constatato l'inevitabile ed irrefrenabile aumento della domanda mondiale di energia.

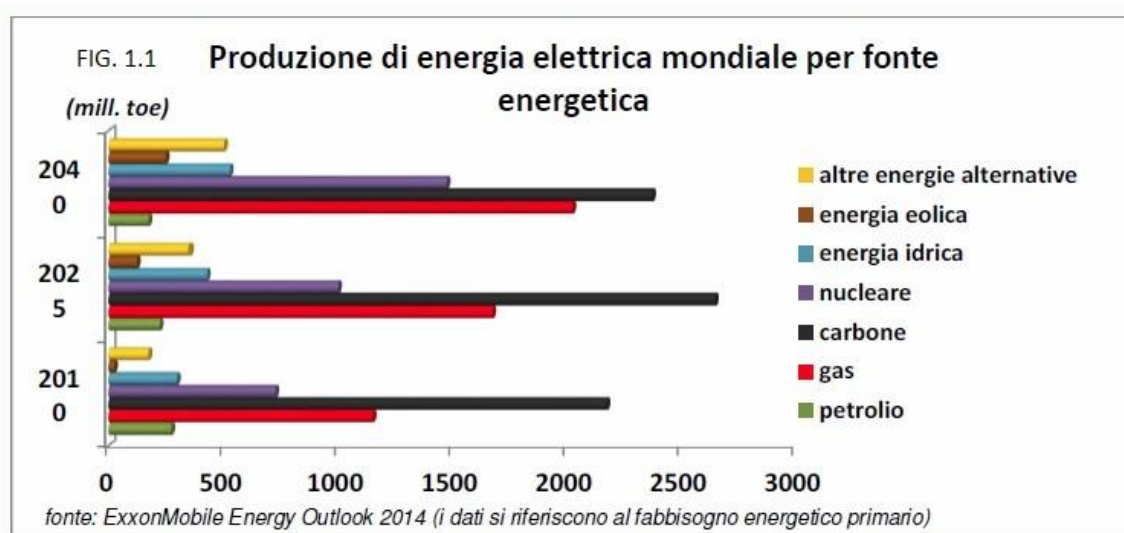
In aggiunta al pericolo concreto di esaurimento delle risorse energetiche fossili, negli anni '80 del 900 si cominciò a discutere seriamente, a livello mondiale, del gravissimo fenomeno dell'innalzamento globale della temperatura atmosferica, ovvero dell'incremento dell'Effetto Serra. In quegli anni, venne istituito un comitato di esperti delle Nazioni Unite chiamato IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), con il preciso scopo di vagliare e sintetizzare tutti i risultati ottenuti dalle numerose ricerche scientifiche effettuate in precedenza (dal fisico Jean Baptiste Fourier fino al chimico Arrhenius). Grazie al Report stilato dall'IPCC si arrivò, quindi, a concludere che la causa principale del surriscaldamento dell'atmosfera terrestre era da imputare alle continue e massicce emissioni nell'atmosfera di Gas serra (nocivi) primo fra tutti l'Anidride Carbonica o CO₂ (più nello specifico vennero indicati come Gas serra inquinanti tutti i prodotti inevitabili della combustione).

Tali problematiche legate al consumo di energia (quali: la scarsità di risorse e l'inquinamento atmosferico) hanno condotto, negli ultimi 20 anni, gran parte dei Paesi membri dell'ONU ad una discussione etico-morale sull'opportunità di intraprendere uno sviluppo sostenibile dal punto di vista climatico. La scelta di una fonte energetica è quindi divenuta un fattore socio-politico complesso oltre che strategico per tutti gli Stati. Oggi, l'investimento a livello nazionale in una Fonte energetica piuttosto che in un'altra, dipende in primo luogo dalla disponibilità della risorsa, ma anche dal costo della stessa, dall'affidabilità del processo di produzione associato e dalla sostenibilità ambientale.

L'energia è il motore dell'economia moderna ed è sempre più una condizione essenziale per lo sviluppo e il benessere di un mondo oramai globalizzato. Per tale ragione, dal 1990 in poi, il tema ambientale ha avuto un'importanza sempre crescente nelle Politiche economiche mondiali per lo sviluppo; tanto che nel 1997 si è giunti alla stesura del famoso Protocollo di Kyoto (1997), con la sua effettiva applicazione nel 2007 e alla sua successiva estensione (fino al 2020) nell'accordo di Doha del 2012. È, infatti, con questo Trattato Internazionale (durante la conferenza ONU sui cambiamenti climatici) che gli Stati, firmatari e ratificanti, si sono impegnati nella effettiva e sistematica riduzione delle emissioni di elementi inquinanti nell'atmosfera, in una misura non inferiore all'8,65% rispetto alle emissioni registrate nel 1985.

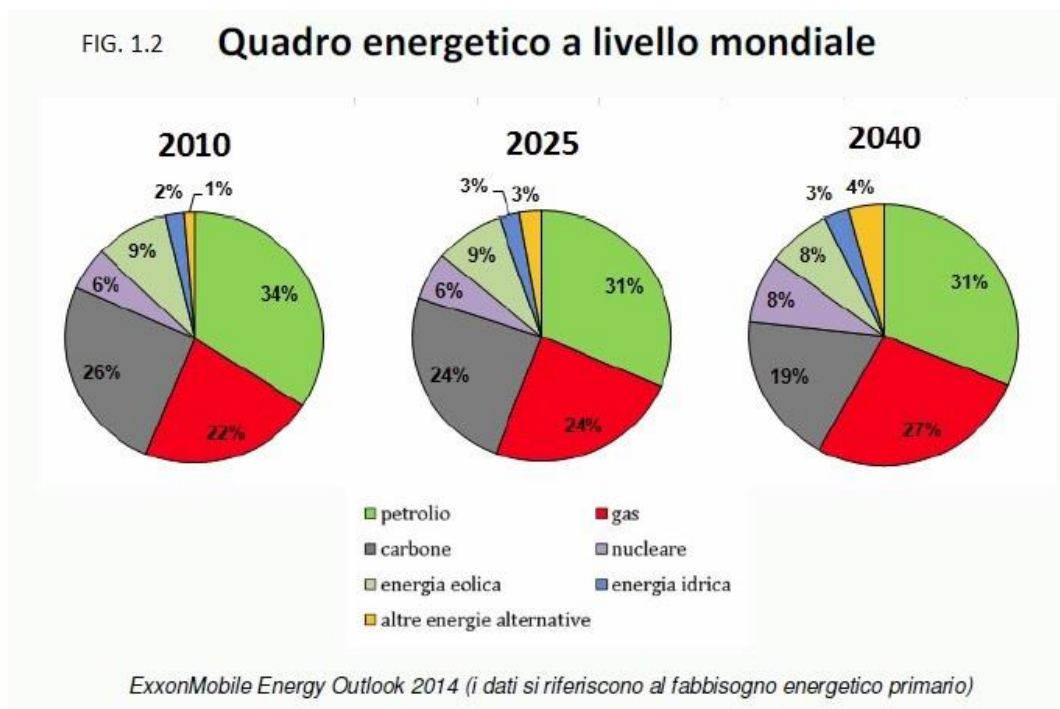
Conseguentemente al Report stilato dall'IPCC sul cambiamento climatico e alla firma del Trattato di Kyoto, l'attenzione delle Politiche energetiche nazionali si è andata sempre più concentrando nella ricerca di Fonti energetiche cosiddette rinnovabili o "alternative" che non si esauriscono con lo sfruttamento da parte dell'uomo.

Nonostante questi enormi "sforzi" dal punto di vista diplomatico, secondo i dati ExxonMobile Energy del 2014, ancora oggi, i combustibili fossili costituiscono la fonte principale di energia mondiale garantendo oltre l'80% del fabbisogno energetico complessivo: di questo 80%, circa il 34% deriva dal petrolio, il 26% dal carbone e 22% dalla combustione del gas metano; il che fa molto pensare su quanto i Paesi firmatari abbiano ben compreso il reale stato di emergenza ambientale o su quanto realmente siano intenzionati a rispettare gli impegni presi.



Secondo quanto detto dal Primo Ministro Norvegese Bruntland nel 1983, la sostenibilità è la capacità di soddisfare le esigenze della società nel presente senza intaccare le stesse esigenze delle società future. La sfida dei nostri tempi è, quindi, quella di mettere in atto un consumo sostenibile delle fonti di energia, che garantisca un progresso economico e sociale soddisfacente, in accordo col principio edonistico di conseguire il massimo utile col minimo sforzo; concetto nobile ma non applicabile a tutte le risorse. Sempre secondo i dati ExxonMobile Energy del 2014, si stima che, al consumo attuale, le riserve mondiali di petrolio possano garantire energia al massimo per i prossimi 60 anni mentre le riserve di gas naturale per i prossimi 80 anni; senza, comunque, tener conto che gli ultimi giacimenti disponibili possono comportare un'estrazione molto più complessa (e geologicamente pericolosa).

Da quanto detto, quindi, si evince facilmente come queste risorse energetiche derivate dai combustibili fossili, largamente usate, non possano essere classificate come “infinite”; non solo per un problema di approvvigionamento limitato ma anche per un effetto d’inquinamento ambientale, correlato al loro utilizzo nei Cicli convenzionali di conversione energetica (cicli Rankine, cicli Otto o Diesel e cicli Brayton Joule).



E in Italia?

Stando agli ultimi dati diffusi da Terna (la società che gestisce la rete elettrica italiana), riferiti al 2015, l’Italia produce l’86% dell’energia elettrica che utilizza in un anno; mentre il restante 14% viene importato dall’Estero. Nel 2014 la produzione lorda di energia elettrica in Italia è stata di circa 280 mila GWh, di questa energia più della metà del totale, circa 150 mila GWh, è stato generato dalle centrali termoelettriche che bruciano combustibili fossili, quindi deriva da fonti non rinnovabili; infatti due terzi di questa energia è ottenuta bruciando del gas naturale, poco meno di un terzo è ricavato dal carbone e il restante dall’olio combustibile.

Nel 2014 il nostro Bel Paese ha registrato un fabbisogno annuo di poco meno di 80 milioni di tonnellate di petrolio, il 90% del quale è stato importato, mentre la produzione nazionale ha soddisfatto appena il 10% della domanda.

A conti fatti, circa il 37% del totale di energia elettrica prodotta in Italia (120 mila GWh), proviene da fonti rinnovabili, la metà di questa proviene dalla produzione idroelettrica; mentre l'energia fotovoltaica è al secondo posto tra le rinnovabili più utilizzate, con circa 22 mila GWh generati nel 2014, seguita dalla combustione delle biomasse, 18,7 mila GWh, e dalla eolica, con 15,2 mila GWh. Finalini di coda sono, invece, il geotermico con 3500 GWh e l'energia da moto ondoso appena 600 GWh.

La produzione di energie da Fonti rinnovabili, in Italia, è cresciuta molto negli ultimi 10 anni ed è decisamente superiore alla media europea (secondo i dati di Terna); infatti, nella classifica dei Paesi europei che hanno la quota più alta di energia proveniente da fonte rinnovabile, sul totale dei consumi, l'Italia è al 12esimo posto davanti comunque a tutti i grandi Paesi europei, tranne la Germania.

In base a tutte queste considerazioni, possiamo ben capire come la ricerca di fonti di energia alternative sia divenuta, col passare del tempo, un dovere nonché una necessità delle società moderne. Negli ultimi 20 anni, infatti, si è alimentata una vera e propria “gara al rinnovabile”, che è stata avviata in primis con la geotermia dall'Inghilterra, poi con gli impianti eolici installati negli USA, passando successivamente per le prime forme di fotovoltaico sempre negli USA ed arrivando infine (nel 1968, in Francia) alla scoperta di una “nuova” fonte di energia sostenibile: il mare e gli oceani.

I mari e gli oceani sono un'enorme fonte di energia che purtroppo è ancora oggi, poco considerata e abbastanza ignorata. Dal mare e dell'oceano sono, infatti, ricavabili più fonti di energia: energia mareomotrice, energia dal gradiente termico, energia dal gradiente salino, energia dalle correnti sottomarine ed energia dal moto ondoso. È su quest'ultima Fonte di energia che questo studio di tesi vuole concentrarsi.

Secondo un report del 2013 pubblicato dalla IEA (International Energy Agency) la resa, a livello mondiale, delle Fonti di energia ricavabili dal mare e dall'oceano è stimata attorno a: 80.000 TWh/anno dal moto ondoso, 800 TWh/anno dalle maree e 10.000 TWh/anno dal gradiente termico. La più seguita e sviluppata è la prima, il moto ondoso infatti fornisce le densità energetiche più elevate nel campo delle energie marine, nonché l'impatto economico più contenuto.

Le tecnologie che mirano a sfruttare queste fonti sono certamente meno sviluppate rispetto a quelle collegate ad altre fonti di energia rinnovabile, ma offrono comunque ampie prospettive di crescita. Un contributo importante allo

nascita di queste tecnologie è stato apportato dallo sviluppo di recenti attrezzature parallele (come turbine, generatori e accumulatori) e dal processo di standardizzazione dell'elettronica di potenza, che garantiscono la disponibilità di convertitori meno costosi e più versatili.

Il motivo principale per cui questo ed altri “settori” del mondo rinnovabile arrancano di fronte allo sfruttamento dei combustibili fossili è sicuramente: il **costo**.

A grandi linee i costi, dell'energia elettrica prodotta in Europa con le diverse Fonti, sono:

- Fotovoltaico: 5-20 c€/kWh;
- Eolico: 4-8 c€/kWh;
- Geotermico: 1.6-8 c€/kWh;
- Idroelettrico: 4.5-11 c€/kWh;
- Biomassa: 4-12 c€/kWh;
- Fonti fossili: 2-4 c€/kWh;

I miglioramenti tecnologici sopracitati nell'ambito dei convertitori, hanno permesso di ridurre drasticamente (quasi di un ordine di grandezza) il costo di un kWh prodotto tramite la fonte energetica del moto ondoso, raggiungendo i 10 c€/kWh; tuttavia esso è considerato ancora troppo elevato per poter considerare queste tecnologie competitive dal punto di vista economico.

Come già anticipato, nelle pagine seguenti ci focalizzeremo principalmente sull'energia che può essere prodotta sfruttando le onde del mare, nonché i principi fondamentali su cui i dispositivi di conversione del moto ondoso basano il loro funzionamento, i quali risultano essere molteplici, diversamente da altre forme di energia rinnovabile. Si pensi che in tutto il mondo sono stati presentati oltre 1000 brevetti su tali dispositivi e secondo recenti studi del IEA-OES (*International Energy Agency - Ocean Energy System*) attualmente si stanno studiando in tutto il mondo (a vari livelli di sviluppo), ottantuno differenti tecnologie per lo sfruttamento dell'energia degli oceani e dei mari.

La primissima applicazione tecnologica in grado di sfruttare il moto ondoso marino, fu la boa a fischio del XVIII secolo. In questo ingegnoso dispositivo, l'aria intrappolata nella calotta della boa galleggiante veniva espulsa emettendo un fischio ogni qualvolta l'onda si ritraeva, allo scopo di avvisare i marinai di pericoli circostanti in prossimità della costa, durante la notte o in caso di nebbia. Prima dell'invenzione delle boe a fischio, si usavano comunemente le boe a campana, nelle quali le oscillazioni della boa dovute all'azione delle onde, facevano sbattere il timpano alle pareti della campana. Sfortunatamente, però, nebbia e bonaccia si presentano spesso e volentieri assieme, in modo tale da rendere le boe a campana meno efficaci, proprio quando sono più necessarie. Dovette trascorrere, poi, oltre mezzo secolo da questa invenzione, prima di assistere al deposito di un primo rudimentale brevetto per lo sfruttamento del moto ondoso, presentato in Francia da Girard padre e figlio nell'ottobre del 1799. Negli anni seguenti, furono presentati centinaia di nuovi brevetti, ben 340 tra il 1855 e il 1973 nella sola Gran Bretagna. La seconda famosa applicazione pratica nell'utilizzazione dell'energia delle onde (sempre nel settore delle boe per la navigazione), avvenne nel 1947 in Giappone, dove l'ingegner Masuda, progettò e pose in opera il primo impianto di tipo OWC da 500 W, il quale era capace di azionare una turbina ad aria per la produzione di elettricità. L'impianto progettato da Masuda fu realizzato nella baia di Osaka in Giappone e l'elettricità prodotta con questo sistema, forniva energia per le luci di navigazione dell'intera costa. Il funzionamento era messo in sicurezza da eventuali mal funzionamenti con delle batterie ricaricabili che si alimentavano dal sistema turbina/generatore nei periodi di maggiore disponibilità. Da questo primo prototipo furono poi sviluppate una serie di boe commerciali, tuttora prodotte dalla ditta giapponese Ryokuseisha; quindi, ancora oggi quest'applicazione rappresenta l'esempio più comune di impianto per la produzione di energia dalle onde.

Dopo lo sviluppo iniziale delle boe per le luci di navigazione, l'interesse per successivi sviluppi rimase scarso fino al 1973, quando il brusco aumento dei prezzi del petrolio, dovuto a un conflitto in Medio Oriente, spinse i governi dei Paesi sviluppati a riesaminare la loro dipendenza energetica dai carburanti importati da zone politicamente instabili (come quelli arabi) e a considerare, quindi, opzioni alternative e più sicure. In diversi Paesi si avviarono progetti sulla generazione di energia dalle onde, e in particolare nel Regno Unito, dove tra il 1974 e il 1983 furono spesi dal governo ben 15 milioni di sterline. L'obiettivo fondamentale del programma britannico era di «stabilire la fattibilità dell'estrazione di energia dalle onde oceaniche e stimare i costi di tal energia, ove la si fosse usata su larga scala per soddisfare le necessità del Regno Unito» (Davies, 1985).

Si considerarono in quel contesto diverse tecnologie, ma nel 1982 la conclusione fu che: «le prospettive economiche complessive per l'energia da moto ondoso sono apparse al quanto scarse in confronto ad altre tecnologie per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili» (Davies, 1985). Nonostante il diffuso disaccordo su questa conclusione da parte di chi lavorava nel settore, il programma fu arrestato, ad eccezione di alcuni sviluppi su scala minore per quei sistemi che apparivano più promettenti. Contemporaneamente, però, nel 1973, il fisico irlandese S. Salter iniziò tutta una serie di esperimenti basati su dei sistemi di produzione d'energia "a galleggiante" presso il dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Edimburgo; il più noto di tali esperimenti fu il cosiddetto "Nodding Duck". Il Salter's duck (come si vede in figura) era formato da un piccolo galleggiante a forma di camma che veniva posto in oscillazione dal moto ondoso permettendo così di azionare un pendolo al quale, a sua volta, era collegato un particolare generatore di corrente.

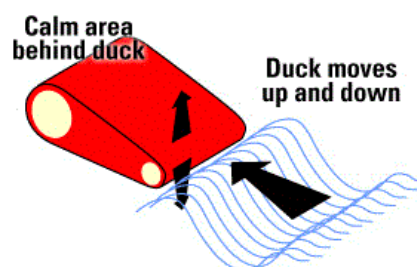


FIG. 1.3 Waves approaching duck

Altri progetti, invece, portarono la Queen's University di Belfast a realizzare un impianto costiero OWC (Oscillating Water Column) cioè un impianto di prova da 75 kW, sull'isola scozzese di Islay, con il quale si sfruttava l'oscillazione di una colonna d'acqua all'interno di una camera, allo scopo di costringere l'aria ad attraversare una Turbina Wells collegata ad un generatore a induzione (il quale convertiva l'energia pneumatica in elettrica). Quel programma di ricerca fornì dei dati sperimentali utili per la progettazione di impianti successivi (Whittaker e Stewart, 1994); in particolare l'impianto OWC LIMPET di Wavegen, anch'esso realizzato sull'isola di Islay nel 2002. Tra il 1976 e il 1979, un famoso gruppo di lavoro giapponese, sotto la supervisione dell'International Energy Agency (IEA), sottopose ad attenta verifica alcuni impianti OWC installati sulla piattaforma galleggiante Kaimei, ormeggiata al largo di Yura, presso la città di Tsuruoka. Questa piattaforma ospitava ben otto camere OWC, ciascuna con una potenza nominale di 125 kW. In quell'occasione, furono sperimentati diversi dispositivi per l'estrazione di energia, comprese le turbine McCormick, le (già citate) turbine Wells autorettificanti e i sistemi a turbina più convenzionali dotati di valvole di rettificazione. Sempre in Giappone, nel 1998, venne avviata la sperimentazione in mare di un altro sistema OWC galleggiante, il Mighty Whale. Il dispositivo, sviluppato dal Japanese Marine Science and TEchnology Centre (JAMSTEC), conteneva tre unità OWC, ognuna delle quali azionava una turbina Wells. Il sistema erogava nel complesso 110 kW; una potenza di tutto rispetto, seppur bassa rispetto alle dimensioni dell'impianto. Questo stava a significare il contenuto energetico relativamente basso delle onde nipponiche, se confrontate con i mari che bagnano le coste dell'Europa Nord-occidentale o del Nord America.

In un programma parallelo portato avanti in Norvegia negli anni '80 (su scala inferiore rispetto a quello britannico) ci si è, invece, concentrati inizialmente su una boa detta 'assorbitore puntiforme', che reagisce al suo ormeggio e basa il suo funzionamento sull'uso di piastre sommerse per la focalizzazione dell'energia delle onde al collettore. L'attenzione dei ricercatori norvegesi, venne in seguito

spostata sulle potenzialità degli impianti OWC e, grazie al supporto della società Kvaerner Brug, nel 1985 venne installato sulla scogliera di Bergen un impianto da 500 kW. Nel 1988, dopo soli tre anni dalla sua costruzione, l'impianto venne distrutto da delle violente tempeste marine; risultò che il cedimento fu dovuto alla corrosione dei bulloni di ancoraggio alla scogliera.

Nel frattempo, nella Repubblica Popolare Cinese, nel 1989 fu costruito un impianto OWC sulla costa dell'isola di Dawanshan, nel Mar della Cina meridionale, il quale fu messo in funzione per breve tempo solo a scopo di test. Questi test, eseguiti su un impianto di medie dimensioni, furono considerati soddisfacenti dagli esperti, con efficienza della camera compresa tra 50 e 150% e un'efficienza complessiva dell'impianto pari al 10-35%.

A partire dal 1976, il Governo svedese finanziò un modesto programma di sfruttamento dell'energia dovuta alle onde, focalizzando l'attenzione soprattutto su un sistema a boa galleggiante in cui, quando l'azione delle onde spinge in alto la boa, un manicotto elastomerico entra in tensione e l'acqua marina (sotto pressione) viene trasferita in un bacino ad alta pressione, dal quale può azionare una ruota Pelton per la generazione di energia elettrica. Appena la boa scende, il manicotto si rilassa e un nuovo carico d'acqua può essere raccolto dal mare. Questo sistema, originariamente sviluppato e testato dall'Inter Project Service (IPS) in Svezia, è stato poi adottato, negli anni '90, per lo sviluppo commerciale dalla compagnia statunitense Aqua Energy.

Si presti attenzione al fatto che la maggior parte dei progetti fin qui descritti (in modo sommario e generico, senza specifiche tecniche) venne sostenuta da dei fondi pubblici. L'effetto combinato della notevole riduzione del prezzo del petrolio, delle prestazioni modeste dei prototipi in termini di efficienza e delle valutazioni pessimistiche sul potenziale a lungo termine dell'energia delle onde, ha, quindi, determinato verso gli inizi degli anni '90 una fortissima diminuzione dei supporti governativi all'intero settore. Intorno allo stesso periodo, però, tra i privati (fortunatamente) crebbe la consapevolezza del fatto che le stime sui costi

energetici non avevano preso sufficientemente in considerazione anche l'impatto ambientale dovuto alle emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera degli impianti operanti con combustibili fossili. Erano, infatti, convinti che se si fosse tenuto conto del costo ambientale complessivo della produzione di energia da combustibile fossile e dal nucleare, le tecnologie sviluppate per lo sfruttamento dell'energia delle onde sarebbero divenute commercialmente allettanti, redditizie. Forti di questa convinzione, diversi imprenditori nel mondo decisero di investire molto denaro in questo settore "industriale"; i pionieri di questo nuovo business furono A. Thomson e A. Wells, proprio l'inventore della turbina omonima, che nel 1990, a Londra fondarono la società Wavegen, allo scopo di sviluppare la tecnologia OWC. In seguito, anche T. Denniss (in Australia) fondò Energetech con l'intento di sviluppare un dispositivo basato su principi simili a quelli dell'OWC. In fine, nei Paesi Bassi, la Teamwork Technology, guidata da F. Gardner e H. Van Bruhgel, ha avviato, nel 2001, un progetto sperimentale nominato AWS (Archimedes Wave Swing). Più recentemente, invece, lo scozzese R. Yemm ha fondato l'azienda OPD (Ocean Power Delivery), per poter commercializzare la zattera articolata Pelamis (Yemm, 2003).

Per quanto concerne il futuro, SeaPower, in Svezia, sta lavorando su di un dispositivo galleggiante a trascinamento costante, mentre il consorzio Wave Dragon, con sede centrale in Danimarca, sta sviluppando un gigantesco impianto a trascinamento con enormi bracci di convogliamento.

Al momento la ricerca nel settore è in fase di lento avanzamento e i punti oscuri o le difficoltà incontrate sono ancora molte. Con il presente progetto di tesi, però, si vuole tentare di introdurre l'argomento esponendo le motivazioni per cui convenga investire nel Ricerca& Sviluppo di questa energia alternativa, piuttosto che in altre. Verranno, quindi, descritti i semplici concetti fisici che stanno alla base del funzionamento di gran parte dei dispositivi che sfruttano il moto ondoso e la potenza delle onde del mare, sempre però mantenendo come focus la loro concreta applicazione al caso italiano.

CAPITOLO 2: LA FISICA E IL MARE

Lo scopo di questo capitolo è di fornire un'attenta analisi, dal punto di vista matematico, del fenomeno fisico delle onde, per arrivare a definire una serie di parametri in funzione dei quali ricavare alcune interessanti equazioni.

In fisica, col termine onda si indica una perturbazione che nasce da una sorgente e si propaga nel tempo e nello spazio, trasportando energia senza comportare un associato spostamento di materia. Le onde marine sono dei casi particolari di onde fisiche, attraverso le quali viene messa in moto la superficie degli specchi d'acqua. Il moto ondoso rappresenta la tipologia di movimento più evidente su qualunque superficie d'acqua più o meno estesa.

Come già accennato sulla terra esiste una particolare interazione tra l'atmosfera e gli specchi d'acqua, e gran parte di questa interazione è dovuta alla presenza dei venti. La causa principale del moto ondoso è imputabile, proprio, all'azione dei venti, i quali soffiando sullo strato d'acqua superficiale operano un trasferimento di energia cinetica e potenziale che si ripercuote sugli strati d'acqua inferiori, per mezzo dell'attrito viscoso. In altre parole, le onde si formano perché il vento spinge lo strato d'acqua in superficie, cedendogli parte della sua energia cinetica (e della sua quantità di moto), affinché possa acquistare una velocità superiore a quella degli strati d'acqua sottostanti. Le onde, inoltre, si propagano in profondità attraverso un moto circolatorio.

A causa dell'attrito viscoso tra le particelle del fluido, ogni strato d'acqua che ha una certa velocità, tende a trascinare con sé lo strato d'acqua sottostante più lento e nel contempo tende anche a rallentare il suo moto. Ciò ci fa capire che, se le onde non sono continuamente alimentate, esse sono destinate a dissolversi, cioè a dissiparsi in un intervallo di tempo finito.

La conseguenza di questo “sfregamento” tangenziale sugli strati superficiali dell’acqua è la formazione delle onde e la loro propagazione. Man mano che l’ampiezza dell’onda cresce aumenta anche la superficie su cui agisce la spinta del vento e ciò comporta un’ulteriore “crescita” dell’onda. Le onde generate dal vento possono spostarsi per migliaia di chilometri senza subire grosse perdite in termini di energia. In prossimità della costa, invece, l’interazione con il fondale comporta spesso delle perdite di energia ma in alcuni casi, tale caduta di potenziale, viene più che compensata da dei fenomeni di concentrazione (indicati con il termine inglese “hot spot”) generati dall’effetto di riflessione o rifrazione dell’onda.

Ai fini della trattazione su di un modello matematico (che per definizione non può che essere semplificativo), si considerino valide le seguenti ipotesi iniziali:

1. si trascurino tutti i gradienti di temperatura;
2. si trascurino i gradienti di salinità;
3. si trascurino i gradienti di pressione idrostatica.

In base alle precedenti semplificazioni si può assumere che l’acqua del mare sia un fluido omogeneo e incompressibile, quindi con una densità ρ costante; e inoltre risulta verificata una prima equazione di continuità:

$$\mathit{div} \mathbf{V} = 0 \quad (1.1)$$

dove \mathbf{V} è il vettore velocità avente componenti: u, v, w ; mentre l’equazione ci dice che la divergenza della velocità dell’onda è nulla, in altre parole la somma delle derivate parziali delle componenti del vettore velocità, lungo gli assi, è identicamente nulla.

L'ipotesi successiva riguarda la bidimensionalità del moto, e quindi la formula (1.1) può essere riscritta come:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1.2)$$

Ulteriori ipotesi semplificative riguardano:

4. l'irrotazionalità del vettore V ;
5. la viscosità trascurabile del fluido marino (acqua);

le quali si traducono, matematicamente, nell'equazione:

$$\text{rot } V = 0 \quad (1.3)$$

L'equazione (1.3) nel caso piano (bidimensionale) in oggetto può essere scritta anche come:

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1.4)$$

Un'onda può essere caratterizzata da una singola oscillazione oppure da una *treno* di oscillazioni, cioè da una successione di onde aventi caratteristiche simili (come ad esempio la periodicità intrinseca). Le onde marine, come qualsiasi tipo di onda, sono caratterizzate da una *cresta* (il punto più alto), da un *ventre* (il punto più basso) e da fronti d'onda di propagazione, nel caso dei treni di onde. I fronti d'onda sono classificabili in longitudinali o trasversali, e in base a questo le onde sono classificate rispettivamente in onde *stazionarie* e *progressive*.

Nota: il rotore di un campo vettoriale è l'operatore vettoriale che descrive la rotazione infinitesima, associando ad ogni punto dello spazio un vettore. È un vettore allineato con l'asse di rotazione, il cui verso è coerente con quello della rotazione (per la regola della mano destra), l'intensità è pari al valore della circuitazione del campo (cioè all'integrale del campo lungo un percorso chiuso) per unità di area, cioè nel limite in cui la curva d'integrazione si riduce ad un punto.

Le grandezze che caratterizzano un'onda semplice sono:

- la lunghezza d'onda λ che corrisponde alla distanza tra due creste;
- l'ampiezza dell'onda che corrisponde all'altezza della cresta rispetto la S.W.L. (*Still Water Line*) ovvero la linea di superficie libera che l'acqua assumerebbe in assenza di onde (pelo libero dell'acqua in quiete);
- il periodo T (misurato in secondi) ovvero il tempo che impiegano due creste successive ad attraversare un punto fissato;
- l'altezza h tra il fondale e la S.W.L. (che ovviamente interessa solo le onde marine).

Nel caso di acqua profonda (cioè con $h > \lambda/2$) la lunghezza d'onda è messa in relazione al periodo dalla seguente formula:

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (1.5)$$

dove: g è l'accelerazione di gravità.

Un'onda che si muove oscillando perpendicolarmente alla direzione di propagazione si definisce onda *progressiva* (ad esempio: le onde su una corda, dove le parti infinitesime si muovono in alto e in basso in verticale, mentre l'onda si propaga orizzontalmente).

La velocità di fase di un'onda si definisce anche celerità (C) e descrive la distanza percorsa da una cresta nell'unità di tempo:

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (1.6)$$

L'onda trasmette energia potenziale e cinetica attraverso il movimento ciclico delle proprie particelle e questa energia viene dissipata in profondità, proprio attraverso diversi strati di oscillazione circolare.

Il diametro del moto di queste particelle diminuisce man mano che ci si avvicina al fondale e in condizioni di mare profondo (con $h > \lambda/2$) non si hanno interazioni con il fondale, perciò la velocità di fase è proporzionale a λ .

In presenza di bassi fondali, invece, il moto circolare viene schiacciato dalla pressione e dal fondale, tendendo ad assumere una forma sempre più ellittica, al diminuire della profondità del fondale. In questo caso (con $h < \lambda/20$) la velocità di fase è proporzionale alla profondità (h).

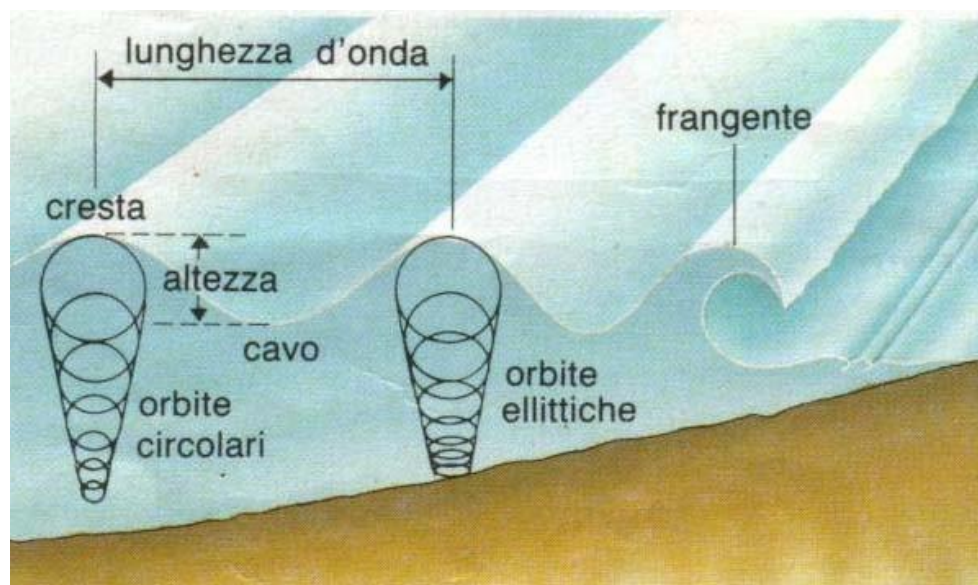


FIG. 2.1 Rappresentazione del moto delle particelle nelle onde, circolare in acque profonde e sempre più ellittico al ridursi della profondità.

Se si considerano delle onde di piccola ampiezza (a/λ e a/h entrambi piccoli) si può applicare la seguente formula per calcolare la celerità:

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (1.7)$$

In condizioni di elevata profondità del fondale, l'argomento della tangente iperbolica tende all'infinito, quindi il termine "tanh(∞)" tende al valore unitario e l'equazione diventa:

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (1.8)$$

Si noti come la velocità di fase, in queste condizioni particolari, dipenda esclusivamente dalla lunghezza d'onda.

Al contrario nei bassi fondali (con $h/\lambda < 1/20$) si ottiene che:

$$C = \sqrt{gh} \quad (1.9)$$

la celerità è direttamente proporzionale alla sola profondità del fondale.

Il periodo dell'onda rimane sempre costante, anche al variare della profondità.

La lunghezza d'onda, invece, è costante in un mare profondo e diminuisce (con la radice quadrata della profondità) nei bassi fondali.

L'energia di un'onda è sempre la somma di due contributi; un contributo di energia cinetica ed uno di energia potenziale, che dipendono principalmente dalla variabile altezza d'onda:

$$E_{onda} = E_{cinetica} + E_{potenziale} \quad (1.10)$$

$$E_{onda} = \int_x^{x+\lambda} \int_{-h}^{\eta} \rho \cdot \frac{(u^2 + v^2)}{2} dz dx + \int_x^{x+\lambda} \rho \cdot g \left[\frac{(\eta + h)^2}{2} - \frac{h^2}{2} \right] dx \quad (1.11)$$

Se l'energia potenziale viene determinata relativamente alla S.W.L (linea di superficie libera dell'acqua in quiete) e tutte le onde si propagano nella stessa direzione, allora i valori dei due contributi di energia coincidono; e vale che:

$$E_{onda} = \frac{pgh^2\lambda}{16} + \frac{pgh^2\lambda}{16} = \frac{pgh^2\lambda}{8} \quad (1.12)$$

Solitamente, però, dal punto di vista fisico ciò che ci interessa ricavare è la *densità di energia* o energia specifica dell'onda, cioè la media totale di energia per una superficie unitaria. La densità di Energia è, quindi, pari a:

$$E_{specifica} = \frac{E_{onda}}{\lambda} = \frac{pgh^2}{8} \quad (1.13)$$

Allo stesso modo, possiamo definire la densità di energia nel periodo di tempo considerato, che rappresenta la densità di potenza per l'onda:

$$P_{specifica} = \frac{E_{specifica}}{T} = \frac{pgh^2}{8T} \quad (1.14)$$

Adesso, anziché considerare la velocità di fase riferita ad una singola onda, introduciamo un nuovo termine, che è la velocità di gruppo (C_g):

$$C_g = n \cdot C \quad (1.15)$$

Il termine “n” è una costante (che non rappresenta il numero di onde), e vale:

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{4\pi h}{\lambda}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)} \right) \quad (1.16)$$

È, in fine, possibile calcolare la potenza per metro di fronte d’onda, che è il parametro più usato per esprimere la Potenza nell’ambito della generazione di energia da moto ondoso:

$$P = P_{specifica} \cdot C_g = \frac{C_p g h^2}{16T} \left(\frac{1 + \frac{4\pi h}{\lambda}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)} \right) \quad (1.17)$$

CAPITOLO 3: CARATTERISTICHE DELLE ONDE REALI

Nella realtà il moto ondoso è caratterizzato da onde di diversa ampiezza, periodo e direzione. Ciò deriva dal fatto che un'onda, una volta generatasi, viaggia per migliaia di chilometri e, quindi, una data località può ricevere onde di diversa origine, con caratteristiche differenti. La condizione ondosa in quella località è perciò data dalla sovrapposizione dei differenti moti ondosi ed è definita mediante uno spettro che considera il contenuto energetico e la direzione dell'onda. In figura (2.2) è rappresentata una registrazione tipica di un'onda marina, e si può ben capire come la sua caratteristica sia assolutamente non periodica.

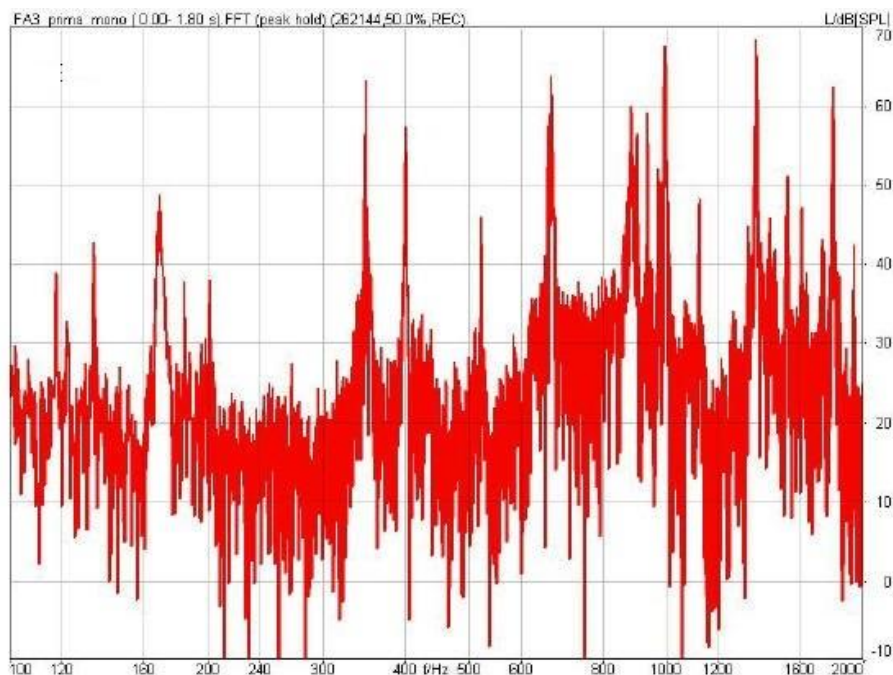


FIG. 3.1 Rappresentazione di un'onda marina reale

A differenti condizioni del fondale, corrispondono diversi livelli medi di potenza delle onde. Per tale ragione, si usa definire un'altezza e una frequenza rappresentativa.

Si definisce altezza “*significativa*” dell’onda (H_s) l’altezza media del primo terzo delle altezze massime registrate per le onde di un determinato sito.

Si definisce periodo “*significativo*” dell’onda (T_s) il periodo medio delle onde utilizzate nella definizione precedente.

Altre grandezze che caratterizzano un’onda reale sono:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^N y_i^2}{N-1}} \quad (1.18)$$

Il termine σ rappresenta l’altezza rappresentativa calcolata come media della radice quadrata della somma dei quadrati degli scostamenti delle altezze rispetto al valore medio dell’altezza delle onde. L’altezza significativa precedentemente definita, quindi, diventa $H_s = 4\sigma$; mentre un valore rilevante del periodo è lo “*zero crossing*” che ha formula:

$$T_z = \frac{D}{N_z} \quad (1.19)$$

Il termine D rappresenta la durata in secondi della serie di dati e N_z il numero di volte che la superficie libera del mare attraversa in una sola direzione l’altezza media dell’onda.

Queste definizioni, però, non sono ancora completamente rappresentative della variabilità delle caratteristiche di un’onda. Si deve, quindi, ricorrere ad una procedura di campionamento di dati e rispettiva elaborazione. Se si ipotizza un andamento aleatorio stazionario ed ergodico delle onde, i valori rappresentativi possono essere ottenuti da un’unica serie di dati.

La migliore rappresentazione delle onde reali si ottiene, allora, considerando il termine densità di potenza $S(f)$, che risulta così definito:

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f \cdot T} \int_0^{T^2} y^2(t, f, \Delta f) dt \quad (1.20)$$

La funzione densità di potenza $S(f)$ può essere determinata nella pratica, filtrando il segnale analogico mediante un filtro selettivo a banda passante. Se l'ampiezza dell'onda $y(t)$ è misurata a partire da un generico riferimento, allora per $f=0$ la funzione $S(f)$ è pari al valore medio dell'altezza dell'onda $y(t)$.

Tramite l'elaborazione dei dati rilevati, possono essere valutati anche tutti i momenti di ordine più elevato dello spettro. Ad esempio il momento n -esimo dello spettro si valuta tramite la seguente relazione:

$$M_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (1.21)$$

Per $n = 0$, il momento $M_0 = \sigma^2$; per cui l'altezza significativa dell'onda può essere calcolata come:

$$H_s = 4\sigma = 4\sqrt{M_0} \quad (1.22)$$

Per $n = 2$, il momento di ordine 2, M_2 può essere utilizzato per determinare il periodo di attraversamento dell'altezza media:

$$T_z = \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (1.23)$$

Per $n = -1$, il momento corrispondente fornisce la potenza per metro di fronte d'onda qualora esso venga pre-moltiplicato per una dimensione pari a: ρg^2 .

In tal caso si può definire un periodo della potenza, che ha equazione:

$$T_e = \frac{M_{-1}}{M_0} \quad (1.24)$$

In conclusione alla nostra trattazione, per un'onda reale, la Potenza per unità di fronte d'onda può essere espressa con la relazione:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} \cdot T_e \cdot H_s^2 \quad (1.25)$$

CAPITOLO 4: POTENZIALE ENERGETICO NEL MONDO E IN ITALIA

Riassumendo quanto detto finora, l'energia delle onde si deve al movimento dell'acqua in prossimità della superficie marina. L'azione del vento sulla superficie dell'acqua determina la formazione e la propagazione delle onde; poiché il vento deriva dall'iterazione tra Sole e atmosfera, allora le onde rappresentano di fatto una riserva di energia solare. Sotto la superficie, le singole particelle d'acqua compiono, quindi, movimenti circolari, mentre la trasmissione di energia avviene nella direzione della propagazione dell'onda.

Nel Regno Unito il Marine Foresight Panel, in un rapporto al Governo britannico, ha affermato che «se meno dello 0,1% dell'energia rinnovabile disponibile dagli oceani e dai mari si potesse convertire in energia elettrica, si sarebbe in grado di soddisfare oltre cinque volte l'attuale richiesta energetica a livello mondiale» (UK Office of Science and Technology, 2006). A quanto pare, quindi, c'è più energia nei mari di quanta l'uomo ne possa ragionevolmente utilizzare, ma con le tecnologie attualmente in via di sviluppo, solo una minima parte di essa è accessibile.

Le condizioni locali dei mari e degli oceani tendono a variare molto lentamente nel tempo, tanto da poter essere considerate stazionarie per diverse ore (in prima approssimazione). L'insieme delle condizioni del mare che caratterizzano una certa località, nel periodo di tempo di un anno, costituiscono il “*Wave climate*” di tale località. La conoscenza del *Wave climate* di una regione, è un dato di grande importanza per la progettazione di dispositivi di conversione energetica che abbiano un'elevata efficienza.

Si può affermare, con sufficiente approssimazione, che le variazioni annuali del clima delle onde sono legate alle caratteristiche di una specifica zona geografica e risultano piuttosto limitate.

Tali informazioni sull'andamento del clima marino, vengono ricavate dalle moderne boe meteorologiche, le quali forniscono dati in maniera continua e semplificata.

Le figure (4.1) e (4.2) mostrano la distribuzione a livello globale delle risorse energetiche generate dal moto ondoso, espresse in termini di potenza per metro di fronte d'onda, ovvero in densità di potenza (kW/m).



FIG. 4.1 Risorse di energia resa disponibile dalle onde (valori espressi in kW/m).

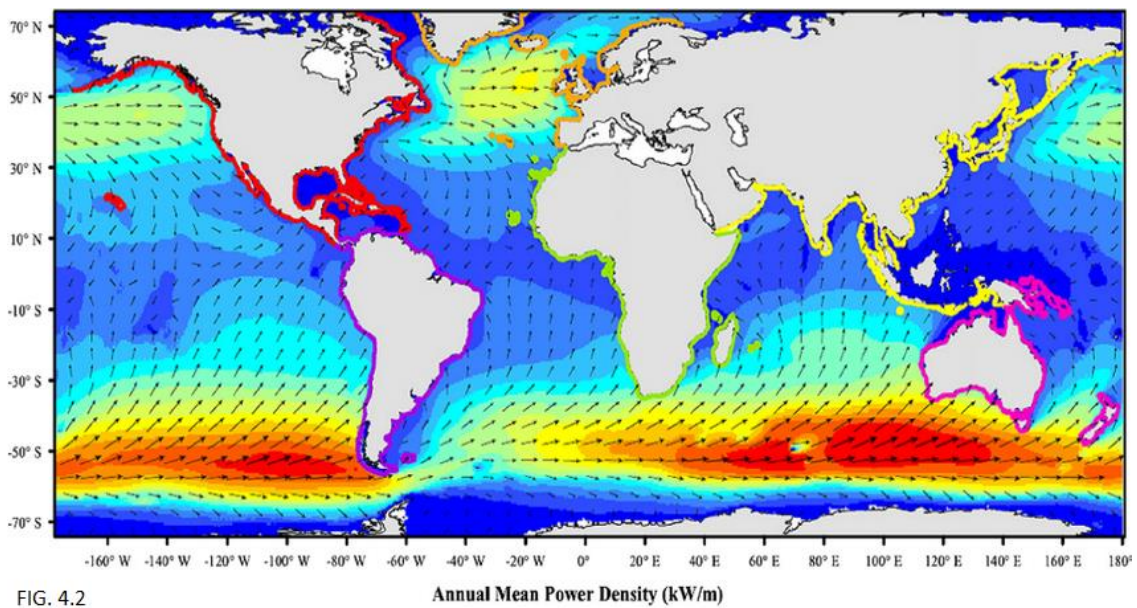


FIG. 4.2

Le zone con moto ondoso di maggiore contenuto energetico sono quelle esposte alle direzioni principali dei venti oceanici ed in particolare le coste a nord-ovest del Nord America, a sud-ovest del Sud America, le coste occidentali dell'Europa (nelle quali primeggiano il Regno Unito e l'Irlanda), le coste del Sud Africa, le coste neozelandesi e quelle meridionali dell'Australia. I valori tipici medi annuali di energia del moto ondoso in mare aperto, nelle zone più favorevoli, variano tra 20 e 70 kW/m.

Le onde generate in acque profonde perdono col tempo pochissima energia, fino a quando, però, non cominciano a “sentire il fondale”; a questo punto l'energia viene dissipata per attrito sul fondale stesso.

Statisticamente, ciò diventa significativo quando la profondità dell'acqua scende al di sotto della metà della lunghezza d'onda del moto ondoso. La diminuzione dell'energia con la profondità dipende dalla batimetria locale, cioè dal profilo altimetrico delle coste, e in particolare dalla pendenza del fondale. Un fondale lungo e piatto dissipa più energia di un fondale corto e ripido.

La maggior densità di energia che si ha nelle acque profonde le rende interessanti per molti progettisti, ma è anche vero che l'ambiente, in acque profonde, è più difficile che in prossimità della costa e di conseguenza gli aspetti tecnici presentano potenzialmente maggiori problemi. Stando ai dati dell'istituto britannico ISGG, nel 2012 la potenza complessiva globale installata ammonta a 0.54 GW contro i quasi 200 GW dell'eolico; e questo dato evidenzia, quindi, lo stato embrionale del settore.

Il moto ondoso nel bacino del Mediterraneo, risulta particolarmente intenso durante la stagione invernale e autunnale, con dei valori più elevati presenti nel Mediterraneo occidentale, in particolare nel golfo del Leone e nella zona compresa tra le isole Baleari e la Sardegna. Altra regione interessata da valori sostenuti di altezza significativa delle onde, nelle stesse stagioni dell'anno, è quella del Canale di Sicilia e del Mar Ionio (come si vede da FIG. 4.3 e FIG. 4.4).

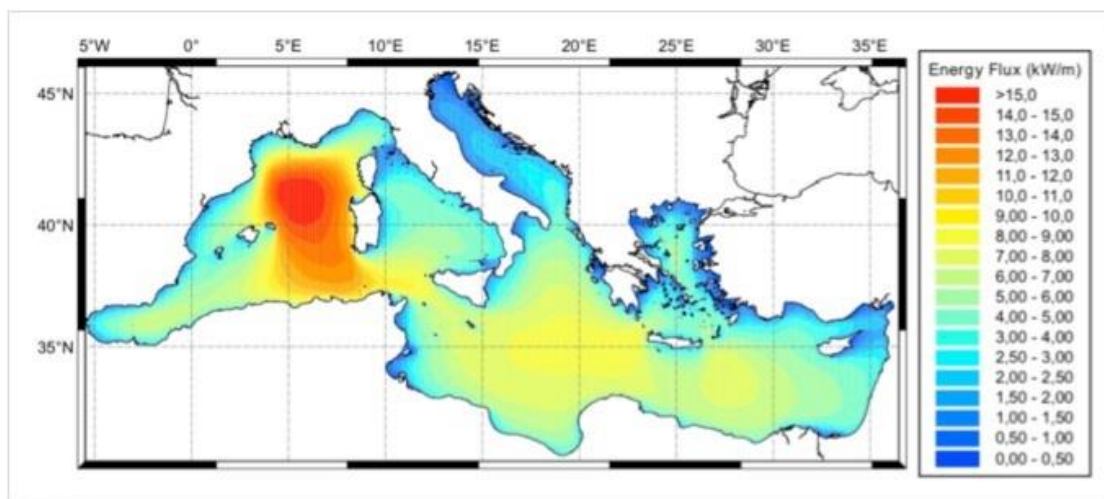


FIG. 4.3 Flusso energetico annuale nel bacino del Mediterraneo

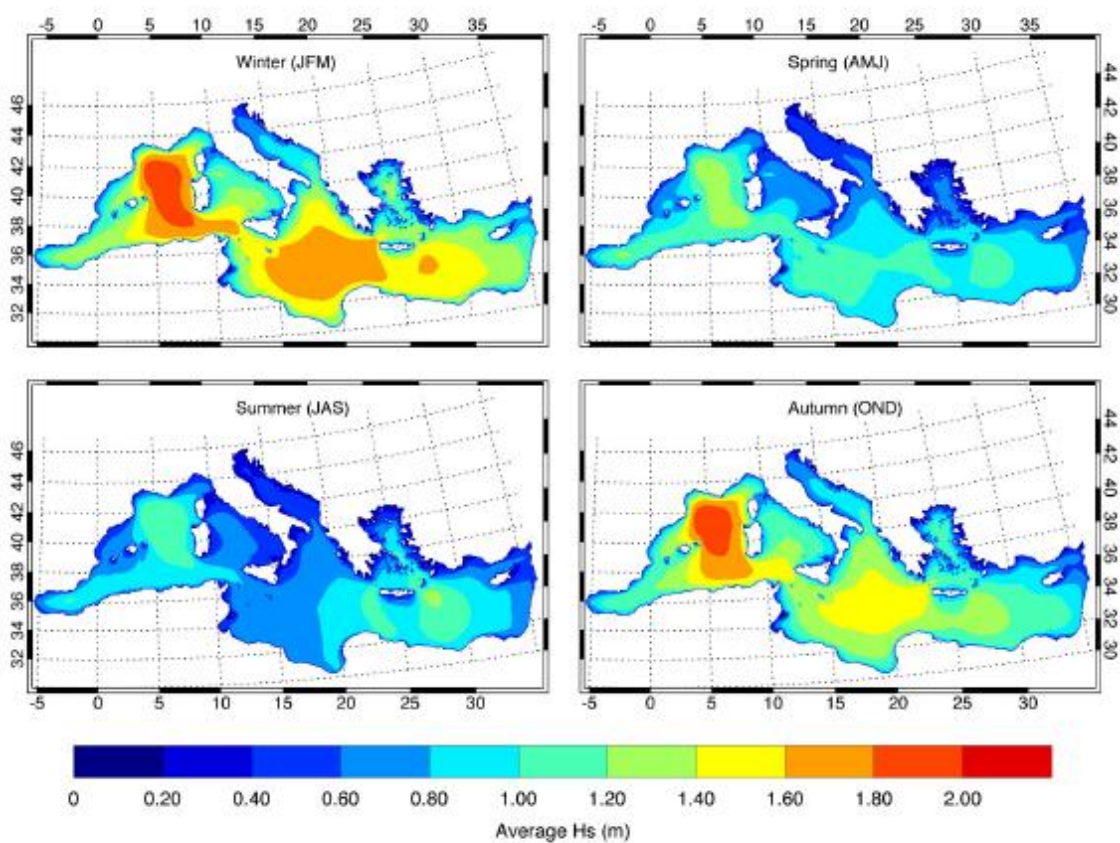


FIG. 4.4 Altezza media delle onde, per ogni stagione dell'anno, nel Mediterraneo

E in Italia? Per quanto concerne il caso italiano, il mar Adriatico presenta un valore medio di energia delle onde pari a 2 kW/m (molto modesto), mentre il mar Jonio ed il mar Tirreno un valore medio di 3 kW/m; caso isolato è, invece, il Tirreno inferiore con più di 4 kW/m. Secondo i dati ENEA (ricavati attraverso l'impiego di boe RON e simulazioni con software SIM), i valori più interessanti toccano la Sardegna, con la costa nord-occidentale di Alghero che fa registrare un valore medio annuo di 9 kW/m con picchi nei mesi invernali (da novembre a febbraio) fino a 15 kW/m (si veda FIG. 4.5).

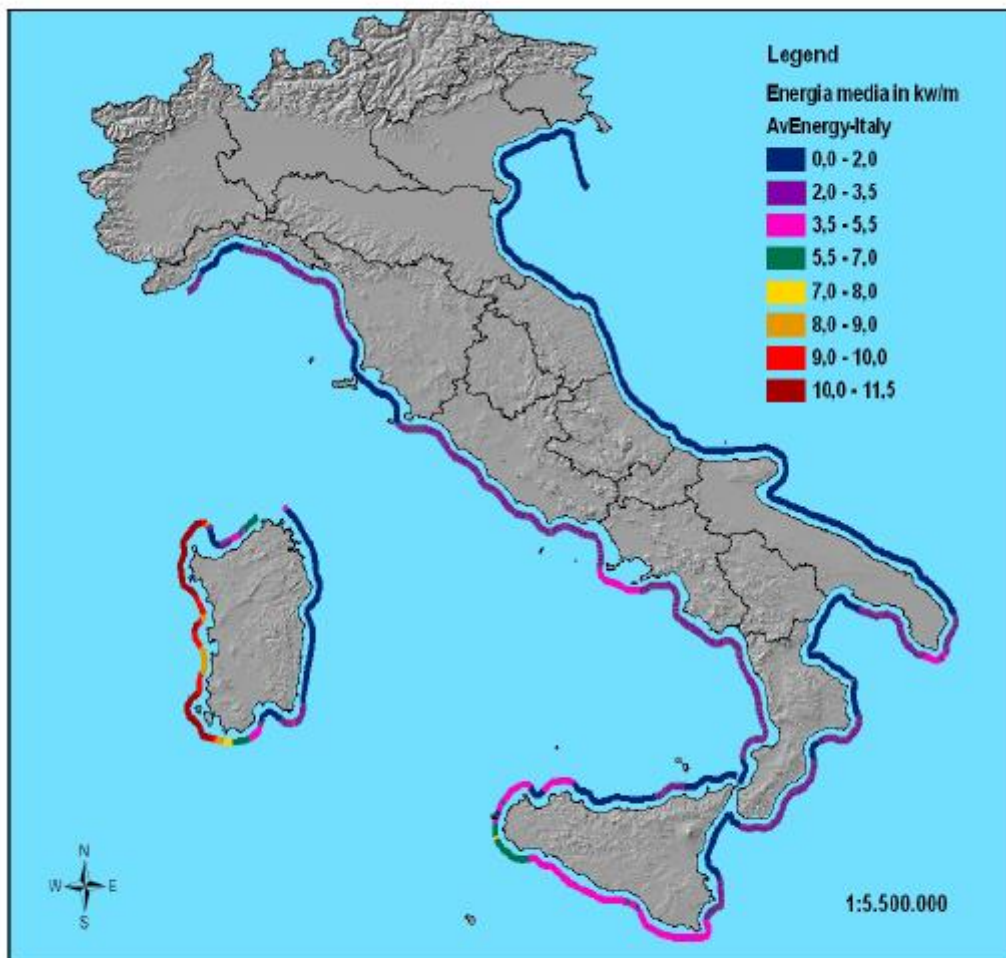


FIG. 4.5 Distribuzione della densità di Potenza media annuale

Solo in corrispondenza delle località di Mazara del Vallo (Sicilia) e dello stretto di Messina i valori registrati dalle boe superano i 5 kW/m per metà dei mesi.

CAPITOLO 5: CLASSIFICAZIONE DELLE PRICIPALI TECNOLOGIE

Non esiste una classificazione ufficiale dei sistemi per la generazione di energia dalle onde. Quella adottata in questa sede è in realtà arbitraria e assolutamente non onnicomprensiva, ma descrive comunque la maggior parte dei dispositivi attualmente in via di sviluppo.

A differenza delle altre risorse energetiche esiste una grande varietà di dispositivi di conversione dell'energia da moto ondoso in elettricità. Tali dispositivi vengono chiamati WECs (*Wave Energy Converters*) e ognuno di essi, presenta i propri vantaggi e svantaggi in termini di efficienza, manutenzione, costo di investimento iniziale, difficoltà burocratiche e densità di potenza nominale sviluppata.

I dispositivi per la conversione da moto ondoso possono essere classificati in diversi modi:

1. in base al loro posizionamento rispetto alla costa;
2. in base alla loro disposizione rispetto al fronte d'onda;
3. in base al principio di conversione e di funzionamento adottato.

Nella classificazione per posizione rispetto alla costa, possiamo distinguere tra:

- **Shoreline Devices** (o di prima generazione), questi dispositivi sono installati sulla costa, con una propria fondazione o incassati in strutture frangiflutti portuali. Vengono definiti di prima generazione perché nel secolo scorso furono le prime tecnologie studiate e realmente installate vista la maggiore semplicità nella realizzazione.
 - Vantaggi: assenza di ormeggi profondi e di lunghi cavi elettrici sommersi in acqua (che sono la fonte principale di perdite durante il trasporto a terra dell'energia); agevole manutenzione e facilità di

installazione, che garantiscono ridotti costi d'investimento iniziale. Questi dispositivi possono beneficiare (in taluni siti) di effetti di concentrazione e riflessione dell'onda dovuti al basso fondale.

- Svantaggi: dissipazione di potenza del moto ondoso dovuta alla iterazione con il fondale basso, che attenua l'onda; necessitano di caratteristiche geologiche particolari per evitare l'effetto dello sprofondamento e del sifonamento; presenza degli intervalli di marea, dei quali tener conto per massimizzare i periodi di utilizzo; impatto visivo notevole e tutela del paesaggio.

- **Near to Shore Devices** (o di seconda generazione) questi dispositivi vengono installati in una fascia di transizione tra la riva e la zona delle acque profonde, tipicamente ad una profondità di 20-30 m ed a una distanza dalla riva di circa 500 metri.

- Vantaggi: maggiore ampiezza delle onde rispetto al caso precedente e possibilità d'installazione delle attrezzature sul fondale; in questi dispositivi il convertitore (si veda in seguito) è totalmente interessato dal moto ondoso, garantendo una captazione più efficace; minore impatto visivo e ambientale.
- Svantaggi: maggiori costi di manutenzione e di installazione; ed essendo impianti sommersi, sono sottoposti a carichi dinamici molto più elevati.

- **Off-Shore Devices** (o di terza generazione) questi ultimi sono installati in acque profonde (> 40m) e si tratta di dispositivi galleggianti ancorati al fondale che si basano sugli stessi identici principi dei "Near to shore". Inizialmente erano considerati irrealizzabili visti gli enormi costi di installazione, ma si diffusero poi con lo sviluppo di nuove tecnologie off-shore in combinazione anche con le piattaforme petrolifere.

- **Vantaggi:** consente di sfruttare la densità energetica maggiore delle onde in mare aperto; le onde conservano quasi interamente la loro energia, vista la minima interazione con il fondale, quindi è quasi nulla la dissipazione di energia; minimo impatto ambientale.
- **Svantaggi:** come per i dispositivi di seconda generazione, si hanno elevati costi di installazione e manutenzione; i principali svantaggi sono quindi geografici, perché il mare aperto infatti è caratterizzato da condizioni più estreme rispetto alle due precedenti soluzioni, che obbligano a realizzare una costruzione più resistente; inoltre l'installazione in mare aperto rende complesso il trasporto dell'energia a terra (con forti perdite di una linea in cavo); per questi motivi non è conveniente realizzare un impianto Off-shore di piccola potenza.

Nella classificazione per posizionamento rispetto al fronte d'onda, si hanno:

- **Assorbitori puntuali** (Point absorbers), presentano una dimensione caratteristica molto minore rispetto alla lunghezza d'onda; possono sfruttare sia la risalita che l'abbassamento dell'altezza d'onda in un singolo punto e possono raccogliere energia da una porzione d'onda maggiore del loro diametro. Sono in grado di catturare l'energia dell'onda da qualsiasi direzione, in quanto la loro struttura è una boa galleggiante formata da una parte immobile e una mobile guidata dal moto ondoso. Questo moto relativo tra i due componenti è utilizzato per guidare dei convertitori di energia elettromeccanica o idraulici.
- **Attenuatori** (Attenuators), si tratta di strutture galleggianti posizionate parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda. Sono formate da più segmenti incernierati tra loro, per una lunghezza complessiva pari o maggiore alla lunghezza d'onda. Le diverse altezze d'onda, lungo lo sviluppo del dispositivo, producono la flessione delle parti connesse

andando ad attivare delle pompe che stanno tra ogni coppia di segmenti. Le pompe poi, a loro volta, azionano dei generatori. Un importante dispositivo di questo tipo è il Pelamis (che in seguito vedremo più nel dettaglio).

- **Terminatori** (Terminators), sono posti parallelamente al fronte d'onda, cioè ortogonalmente alla direzione di propagazione dell'onda, e quindi sono in grado di ostacolare significativamente la propagazione dell'onda catturando e riflettendo la sua energia (potenziale). Sono tipicamente di tipo "Shoreline".

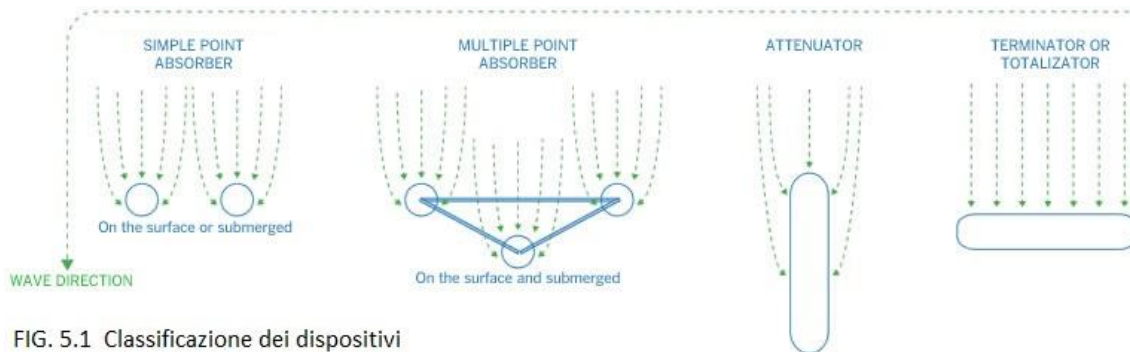


FIG. 5.1 Classificazione dei dispositivi

Nella classificazione in base al principio di funzionamento, si elencano:

- **Dispositivi a tracimazione** (OverTopping Devices, OTD), possono essere galleggianti o fissi a riva. Sono composti da una rampa che convoglia dell'acqua, il cui livello di cresta è inferiore all'altezza dell'onda. L'acqua, quindi, si riversa in un bacino (o in un serbatoio) e viene successivamente scaricata nel mare facendola prima passare attraverso una turbina (tipo Kaplan) ad asse verticale, funzionante a bassa caduta (con salto minimo) e resistente alle condizioni marine. L'energia cinetica dell'onda, attraverso la rampa, viene convertita in un'energia potenziale che è soggetta a piccole fluttuazioni; poiché la conversione avviene in condizioni di quiete all'interno del bacino. In alcuni sistemi si utilizza una rampa piatta di

larghezza costante nella quale l'acqua si può sollevare per più di 3 m, rendendo così possibile l'integrazione con frangiflutti portuali. Di contro si ha che tali dispositivi vanno installati solo in presenza di *Wave climate* particolarmente energetici.

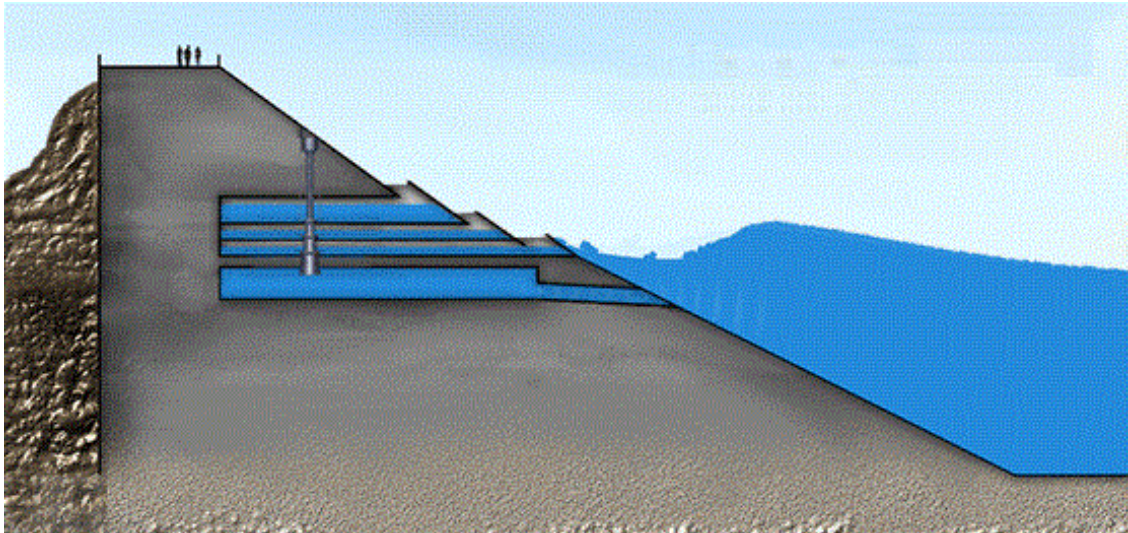


FIG. 5.2 Schematizzazione di un captatore Overtopping fisso a riva

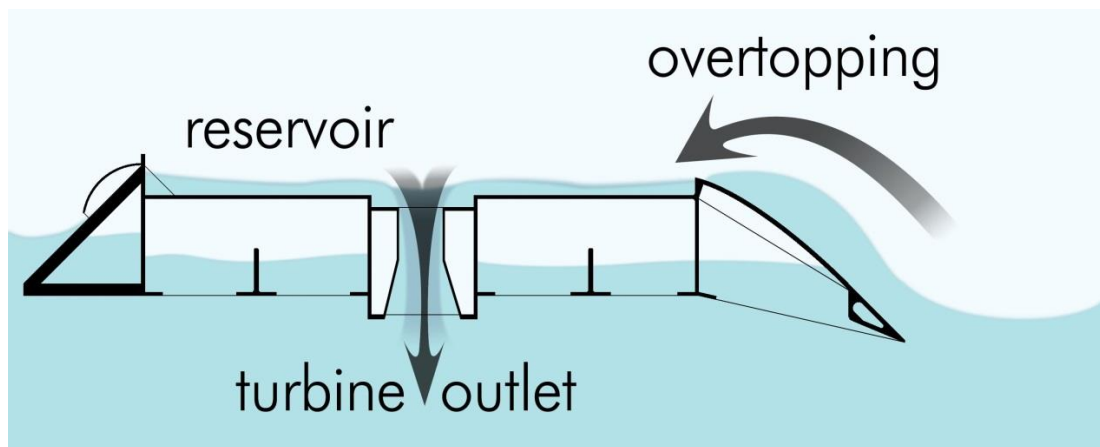


FIG. 5.2 Schematizzazione di un captatore Overtopping galleggiante

- **Dispositivi a colonna d'acqua oscillante** (Oscillating Water Column, OWC), sono la tecnologia più diffusa e si basano sull'azione di una colonna d'acqua oscillante all'interno di un contenitore parzialmente sommerso (la camera), chiuso solo da un lato e che funge da collettore. Sotto l'azione delle onde, l'acqua scorre dentro e fuori l'apertura inferiore, ovvero entra ed esce dalla camera, cedendo parte della sua energia all'aria contenuta nel dispositivo, la quale, a sua volta, si comprime e decomprime azionando una turbina (solitamente di tipo Wells auto-rettificante) collegata ad un generatore. In altre parole, il movimento oscillatorio delle onde (stazionarie, in prossimità dell'ostacolo rappresentato dalla struttura stessa) pressurizza e depressurizza alternativamente la massa d'aria nella camera, la quale mette in moto una turbina associata a un generatore di corrente. Ai due distinti momenti di risalita e discesa del fronte d'onda, corrispondono pressurizzazione e depressurizzazione della camera d'aria e, quindi, il flusso che investe la turbina è alternato nei due sensi. La turbina più usata è la turbina Wells auto-rettificante che mantiene la rotazione invariata cioè obbligatoriamente unidirezionale (a causa dell'alternatore collegato).

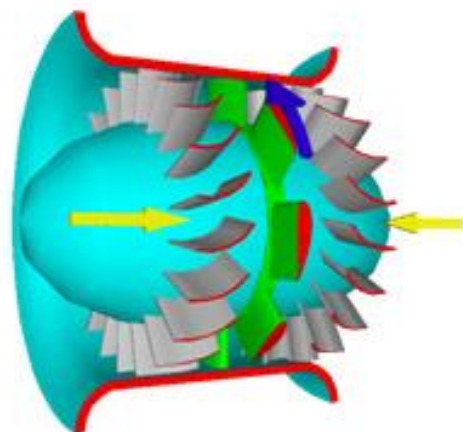


FIG 5.3 Particolare costruttivo di una turbina auto-rettificante

La turbina *Wells* (dal suo ideatore Allan Wells), dispone di palettatura a pale simmetriche disposte a 90° (ortogonali) rispetto alla direzione assiale, in questo modo la potenza media è sempre positiva anche quando il flusso si inverte. Sebbene possieda un'efficienza di picco minore di altre, il largo impiego di questa turbina è favorito dal basso costo, per la semplicità di costruzione e d'installazione. Vanno considerati anche alcuni aspetti negativi come la bassa coppia (anche negativa con conseguente difficoltà di avviamento), la forte caduta di potenza a bassi regimi e l'elevata rumorosità ad alti regimi.

Posti solitamente sulle scogliere e realizzati in cemento armato, anche questi tipi di dispositivi possono essere integrati a strutture frangiflutti ma presentano problemi ambientali di tipo visivo e acustico. A partire dalla metà degli anni '80 sono stati posti in funzione, in diversi siti nel mondo, più prototipi di unità OWC (come ad esempio il *Limpet*).



FIG. 5.3 Schematizzazione di un captatore O.W.C.

- **Zattere articolate** (Wave Activated Bodies, WAB), si tratta di una tipologia di assorbitori puntuali, dove le onde comportano dei movimenti relativi tra le componenti modulari del sistema, oppure tra il sistema ed un riferimento fisso. Di solito, una pompa idraulica situata tra una coppia di elementi, rifornisce un accumulatore dal quale il fluido pressurizzato aziona un motore ed un generatore.

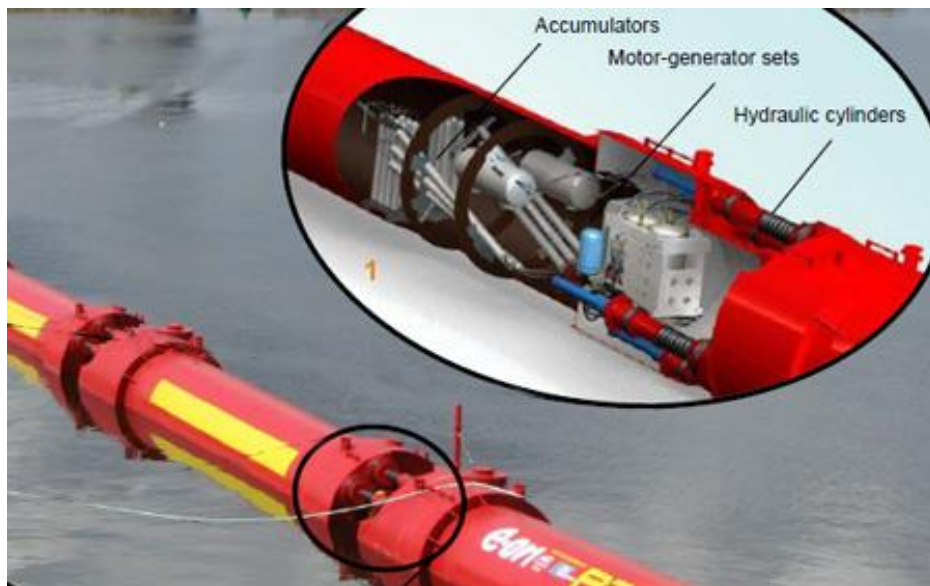


FIG 5.4 Particolare costruttivo di un impianto a zattere articolate.

In altre parole è il moto relativo tra i segmenti snodati della zattera, che consente l'azionamento dei pistoni idraulici, i quali sono accoppiati ad un generatore che trasforma l'energia meccanica in elettrica. La possibilità di un segmento di interagire con quello adiacente, dà luogo ad un sistema autonomo evitando, così, di vincolare al fondale ogni parte attiva del dispositivo. Le zattere sono collocate perpendicolarmente rispetto al fronte d'onda e le onde, quindi, risultano attenuate dopo aver superato la zattera. Per tale ragione, fanno parte di questa categoria principalmente i dispositivi attenuatori, di cui un esempio è il già citato *Pelamis*.



FIG 5.5 Foto di un impianto Pelamis installato a largo delle isole Orcadi.

- **Boe e galleggianti**, questi dispositivi vengono utilizzati come collettori di energia in molti sistemi per la produzione di energia dalle onde. Si è dimostrato, sia analiticamente sia praticamente, che boe relativamente piccole possono raccogliere energia da una porzione di fronte d'onda maggiore del loro diametro e questo effetto di “assorbitore puntiforme” è uno degli elementi su cui si concentra maggiormente l'attenzione dei progettisti. Alcuni sistemi utilizzano delle boe rigide e sfruttano la spinta idrostatica per azionare un meccanismo di estrazione di energia; si può trattare di un cilindro con pistone idraulico tra la boa galleggiante e il fondale (o tra la boa e una piastra frenante), oppure può essere un riferimento inerziale come una massa d'acqua. Alcune boe contengono una colonna d'acqua e sfruttando il movimento relativo della boa rispetto alla superficie dell'acqua, agiscono sulla colonna d'acqua stessa, da cui poi estraggono energia attraverso il meccanismo di turbo-generazione. Una difficoltà notevole nella progettazione di una boa per la generazione di energia dalle onde consiste nel fornire le forze che azionano il collettore d'energia e ottenere una reazione adeguata senza trasmettere tali forze alle fondamenta o agli ormeggi.

- **Dispositivi a galleggiamento controllato**, sfruttano il principio di funzionamento delle boa parzialmente immerse. La variazione di altezza dell'acqua all'esterno della boa provoca una variazione della spinta di galleggiamento che genera una forza sul sistema. Se una boa rigida è completamente sommersa, il passaggio di un'onda non influisce sulla sua spinta idrostatica e non se ne ricava alcuna forza. Se invece la boa è flessibile, la variazione di pressione causata dal passaggio di un'onda provoca una variazione di volume della boa, con un conseguente cambiamento della spinta idrostatica. Nei dispositivi a galleggiamento controllato si ha un volume d'aria intrappolato ma esposto alla pressione locale del mare, in parole povere si ha una boa riempita d'aria e aperta alla base. L'aria nella boa è sotto pressione in modo tale che la boa stessa galleggi in equilibrio a una certa quota prescritta al di sotto della superficie. Al passaggio della cresta di un'onda, la pressione dell'aria aumenta, si perde spinta idrostatica a causa della compressione dell'aria e la boa affonda. Al passaggio del cavo dell'onda succede il contrario e la boa viene spinta verso l'alto. L'estrazione di energia avviene per via idraulica o attraverso un generatore lineare.

CAPITOLO 6: RELAZIONI DI FUNZIONAMENTO

Una volta viste le tipologie tutt'oggi disponibili, è bene esporre due importanti relazioni che caratterizzano il funzionamento di alcuni dei dispositivi elencati.

- **Dimensioni (corpo oscillante):** non esiste alcuna proporzionalità fra l'energia captabile e le dimensioni del captatore del moto ondoso. Piccoli dispositivi possono, infatti, beneficiare del vantaggioso effetto del “captatore puntuale” secondo il quale un piccolo corpo oscillante di forma circolare, il cui diametro risulta trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda λ , può assorbire una frazione pari a $\lambda/2\pi$ di energia contenuta nell'onda.
- **Frequenza:** studi teorici (non presentati in questa trattazione) mostrano che per ottenere le migliori prestazioni in termini di recupero energetico la frequenza propria dei convertitori dovrebbe essere uguale alla frequenza delle onde; in questo modo l'impulso forzante dovuto alle onde avrebbe impatto sul sistema in accordo con la sua frequenza naturale. Si può prendere come esempio un'altalena che oscilla, se le viene fornito un impulso nel momento in cui questa si trova a un estremo dell'oscillazione, si ottiene un incremento del moto oscillatorio con poco sforzo. La coincidenza tra frequenza naturale del dispositivo e quella delle onde è però molto difficile da creare poiché la prima (dispositivo) è generalmente maggiore della seconda (onda), la quale poi nella realtà è composizione di più frequenze.

CAPITOLO 7: RICAVARE ENERGIA DALLE ONDE

L'energia di un'onda è localizzata per il 95% tra lo S.W.L. e il massimo del primo quarto di lunghezza d'onda. Come già detto, quest'energia può essere estratta in molti modi e ciò ha consentito la nascita di parecchie varietà di dispositivi.

Le onde contengono essenzialmente tre moti:

1. Un moto orizzontale parallelo alla linea di propagazione dell'onda detto di avanzo o “surge”;
2. Un moto orizzontale perpendicolare alla propagazione dell'onda detto di deriva o “sway”;
3. Un moto verticale (up and down) detto di sussulto o “heave”.

Una volta installati, i dispositivi subiscono anche diversi moti rotatori:

- quello lungo longitudinale prende il nome di rollio o “roll”;
- quello lungo l'asse laterale si chiama di beccheggio o “pitch”;
- quello sull'asse verticale che viene detto di imbardata “yaw”.

La maggior parte dei dispositivi sfrutta una combinazione di questi moti rotatori in contemporanea. In generale gli assorbitori puntuali sfruttano il moto “heave” per muovere un pistone lungo l'asse verticale, i terminatori e gli OWC convertono il moto “surge” in energia elettrica, mentre gli attenuatori sfruttano principalmente il “pitch”.

Tra tutti i concetti sviluppati per i WECs, circa il 53% dei dispositivi sono del tipo assorbitori puntuali, il 33% terminatori e solo il 14% attenuatori.

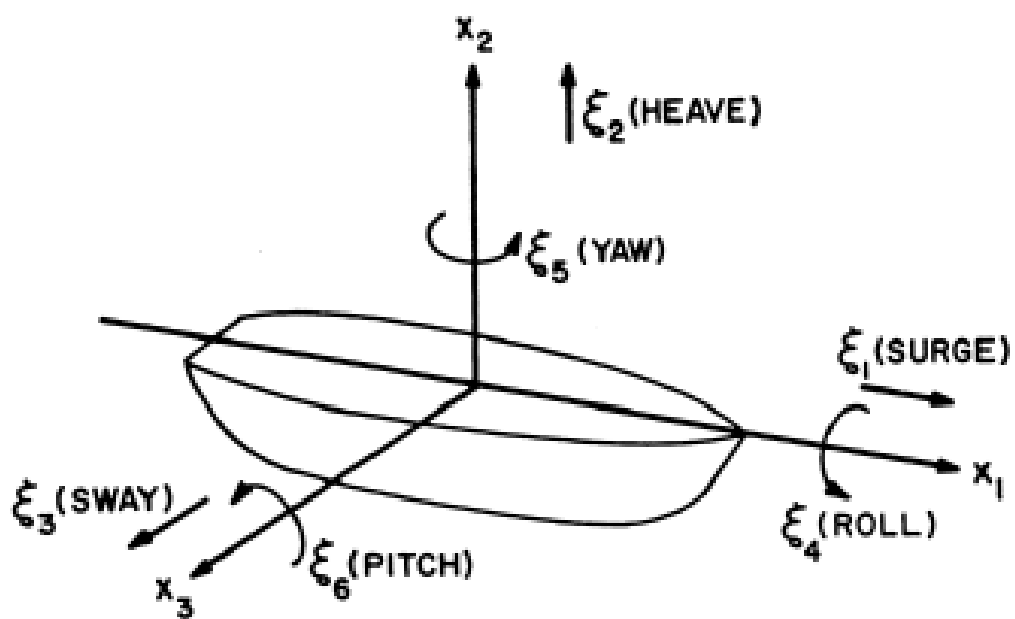


FIG. 7.1 Moti di transizione e di rotazione cui è soggetto un WEC

Di seguito sono elencati gli impianti attualmente funzionanti nel Mondo, o dei quali è prevista l'installazione.

FWPV di SeaPower. La società svedese SeaPower International AB, dopo aver testato un prototipo su scala ridotta del suo dispositivo FWPV (Floating Wave Power Vessel; Lagstroem, 1999), ha annunciato il progetto di installare un impianto da 1,5 MW al largo delle isole Shetland. L'impianto pilota da 160 t è stato sperimentato in mare aperto per otto mesi (compreso il periodo invernale) e sulla scorta di questi test la società si è assicurata, nel 1999, un contratto nel Regno Unito per la fornitura di energia da fonte rinnovabile, nell'ambito della Scottish Renewables Obligation.

Pelamis (OPD). L'impianto Pelamis è ancora oggi in fase di sperimentazione presso il centro EMEC (European Marine Energy test Centre) nelle isole Orcadi (Thorpe, 1998, 1999). Si tratta di una zattera articolata costituita da quattro segmenti cilindrici lunghi 30 m. Una caratteristica innovativa consiste nel fatto che i giunti di collegamento tra i segmenti sono angolati rispetto alla verticale, cosicché una spinta di sollevamento si converte in parte in un'oscillazione, e viceversa. Ciò offre possibilità interessanti di regolazione e consente un ottimo accoppiamento al moto ondoso in condizioni di mare molto diverse.

L'esito positivo dei test presso l'EMEC renderà commercialmente disponibile questo sistema nel giro di pochi anni. Il dispositivo è tipicamente ormeggiato in modo lasco in 50 m d'acqua ed è progettato per passare sotto le onde più grandi, in modo da evitare il sovraccarico della struttura o dell'ormeggio. Il sistema di controllo idraulico consente la restituzione di energia al mare, in modo da realizzare una regolazione attiva e mantenere condizioni ottimali rispetto alle onde incidenti.

AWS Ocean Energy. Il prototipo Archimedes Wave Swing (Vriesema, 1995) è stato installato con successo nel 2005 al largo di Viana do Costella, in Portogallo, per realizzare una serie di test sul campo. La profondità del mare nel sito in cui hanno luogo i test è di 46 m. Il dispositivo, a galleggiamento controllato, è formato da un galleggiante, che contiene dell'aria intrappolata, ed è collocato alla sommità di un cilindro; il movimento relativo dei due, provocato dall'azione delle onde, è frenato da una serie di generatori lineari che convertono direttamente l'energia meccanica in energia elettrica. L'energia generata viene trasmessa a terra attraverso un cavo sottomarino. L'impianto prototipico è stato costruito sopra una struttura d'acciaio galleggiante, progettata in modo da favorire il posizionamento e il recupero durante le fasi di sviluppo del progetto. Si prevede che le versioni future di questo sistema, destinate alla produzione, non avranno una struttura d'acciaio, bensì includeranno delle sub-unità poste al di sotto della superficie del mare, e ormeggiate al fondo in modo lasco.

Energetech. La società australiana Energetech ha installato il suo prototipo di collettore OWC nel 2005. La struttura d'acciaio comprende una sezione, davanti al collettore OWC, che incanala l'energia dell'onda incidente verso l'apertura del collettore, il che consente a quest'ultimo di lavorare a pressioni maggiori e permette un uso più efficiente dei materiali. Il sito per l'installazione del prototipo, Port Kembla, vicino a Sidney, è stato scelto per le sue caratteristiche favorevoli in termini di moto ondoso e di Wave climate; lo scopo era di verificare la capacità del dispositivo come generatore, senza doverlo esporre a condizioni ambientali estreme. Sono previsti ulteriori sviluppi riguardo alla struttura e al sistema di ormeggio, prima di passare all'installazione in un ambiente più severo. Il collettore è dotato di un nuovo sistema per il prelievo di energia, che utilizza la turbina Dennis-Auld al posto della più classica turbina Wells. Si tratta di una turbina a controllo attivo che, adattandosi alle condizioni del moto ondoso, mantiene un regime operativo ottimale. Il prelievo di energia avviene mediante una macchina a induzione azionata da un invertitore.

Wavegen. Il collettore LIMPET di Wavegen è operativo sull'isola scozzese di Islay dal 2000 e fornisce tuttora energia alla rete elettrica locale, funzionando al contempo come impianto di test e controllo per la prossima generazione di dispositivi a turbine per il prelievo di energia. Sfruttando l'esperienza accumulata attraverso il funzionamento di questo impianto, la Wavegen ha progettato un sistema modulare per il prelievo di energia, adatto a qualsiasi tipo di collettore OWC. Ogni impianto comprende una coppia di turbine Wells co-rotanti ai due lati di un motore a induzione ad albero passante, specificamente progettato per questa applicazione. L'alloggiamento del turbogeneratore è collegato a una valvola di isolamento e controllo, ed è anche predisposta l'installazione di un silenziatore. Al contrario della maggior parte dei dispositivi realizzati finora, le unità modulari col collettore LIMPET sono state progettate per la produzione in serie, cosicché l'industria del settore può cominciare a trarre profitto da economie di scala. Il mercato iniziale riguarda dispositivi a partire da 20 kW, da integrare nelle barriere frangiflutti. Con una spaziatura tipica di un modulo ogni 4 m di barriera, un frangiflutti su cassoni può essere convertito, con minime modifiche dal punto di vista dell'ingegneria civile, in un generatore con una produzione di 5 MW per chilometro di frangiflutti. Wavegen, in questi mesi, sta effettuando test di affidabilità su alcune unità prototipo, prima di renderle commercialmente disponibili.

CAPITOLO 9: UN ESEMPIO DI INSTALLAZIONE IN ITALIA

In accordo con quanto evidenziato nel capitolo 4, l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) ha individuato nella famosa isola di Pantelleria, al centro del canale di Sicilia, un sito ottimale che offre le caratteristiche ideali per l'installazione di un dispositivo di captazione innovativo.

L'isola italiana, investita da onde che si originano nella parte sud-ovest del Mediterraneo, è caratterizzata da: elevata energia specifica da moto ondoso, ma anche da difficoltà di approvvigionamento di energia elettrica (se non tramite collegamento marino), oltre che assenza di fattori socio-economici che creino ostacolo al progetto (evidenziati dal GIS). L'isola ha una popolazione residente di poco più di 7000 unità (che raddoppiano nel periodo turistico estivo) concentrata nei pochi centri urbani, soprattutto nel comune di Pantelleria.

Il sistema elettrico a servizio dell'isola è un sistema isolato, non collegato cioè al sistema elettrico nazionale italiano: l'energia viene fornita da una centrale termoelettrica di produzione, costituita da 8 gruppi elettrogeni alimentati a gasolio, per una potenza complessiva di circa 20 MW. Il suo fabbisogno energetico medio è dell'ordine dei 44 GWh annui. Un terzo dei consumi energetici dell'isola sono da imputare solo al settore trasporti, un altro terzo ai consumi delle utenze residenziali e il rimanente terzo alle attività turistiche e all'agricoltura. È da sottolineare che il ciclo di desalinizzazione dell'acqua influisce sensibilmente sul sistema elettrico, sono, infatti, presenti sull'isola due impianti dal consumo annuo di circa 13 GWh.

Il sistema di conversione in oggetto è denominato: **ISWEC** (Inertial Sea Wave Energy Converter) e il principio che governa il funzionamento del dispositivo è basato sull'utilizzo di un giroscopio capace di oscillare su un grado di libertà rispetto allo stesso scafo galleggiante in cui è installato il giroscopio stesso.

Il principio fisico sfruttato dal sistema ISWEC è il principio di conservazione del momento angolare, e l'effetto risultante è chiamato effetto giroscopico. L'effetto giroscopico è un fenomeno fisico che si verifica per i corpi in rotazione (dovuto, come già detto, alla legge di conservazione del momento angolare), e che insorge quando l'asse intorno al quale un corpo sta ruotando (asse a, nella FIG. 9.1) viene sollecitato a cambiare orientamento da una forza che agisce su uno qualsiasi dei piani che contengono l'asse di rotazione (asse b). Si osserva, allora, che lo spostamento dell'asse, che inerzialmente non può avvenire senza la sollecitazione, non si verifica nel piano della coppia (come sarebbe intuitivo aspettarsi), bensì in un piano perpendicolare a esso ed anche alla direzione della forza (asse c). In formule si può scrivere:

$$\vec{L} \times \vec{M} = \vec{N} \quad (1.26)$$

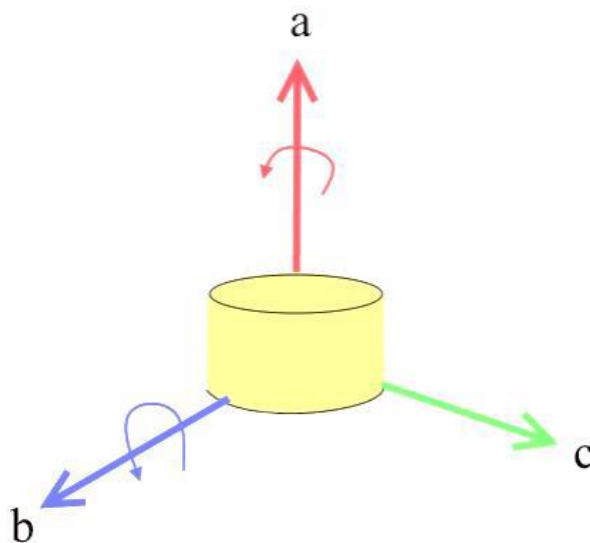


FIG. 9.1 Schematizzazione geometrica della legge

\vec{L} rappresenta il vettore associato all'asse della rotazione φ ; \vec{M} rappresenta il vettore associato all'asse della rotazione δ ; mentre \vec{N} rappresenta l'asse associato al momento generatosi, con rotazione ε . Tra i due vettori secondo la relazione menzionata vige il prodotto esterno (vettoriale), il quale algebricamente fornisce

un vettore risultante appartenente ad un piano ortogonale al piano di partenza (secondo la regola della mano destra).

Lo scafo è caratterizzato da una forma che garantisce l'auto-allineamento con la direzione d'incidenza delle onde. Questa caratteristica funzionale può essere realizzata sia con un'opportuna deriva posteriore avente funzione di timone, in grado di generare un momento raddrizzante sull'asse di imbardata, sia con l'impiego di opportuni sistemi di ormeggio. Di conseguenza, in base a questa caratteristica fisica, il moto ondoso incidente indurrà sullo scafo ideato un movimento prevalentemente di beccheggio. All'interno dello scafo viene alloggiato il convertitore giroscopico che quindi sarà soggetto al moto di beccheggio rappresentato dalla rotazione δ .

Il giroscopio, sospeso sulla piattaforma a singolo grado di libertà (rotazione sul proprio asse), è caratterizzato da una rotazione propria ad elevata velocità (dai 500 ai 1000 rpm) rappresentata dall'angolo φ . Gli effetti giroscopici, provocati dalla rotazione δ dello scafo, ortogonale alla rotazione propria φ del giroscopio, provocano una rotazione ε della piattaforma di sospensione del giroscopio attorno al singolo grado di libertà di cui essa è dotata; in questo modo si ottiene la rotazione ε che viene trasmessa al PTO (generatore elettrico) connesso rigidamente all'asse di rotazione della piattaforma di sospensione del giroscopio.

I componenti principali del dispositivo ISWEC sono:

- Giroscopio;
- Moltiplicatore di giri;
- Cuscinetti di supporto;
- Generatore elettrico (chiamato in questa sede PTO);
- Elettronica di controllo;
- Banco di supercondensatori (per l'avvio del motore elettrico in caso di mare piatto).

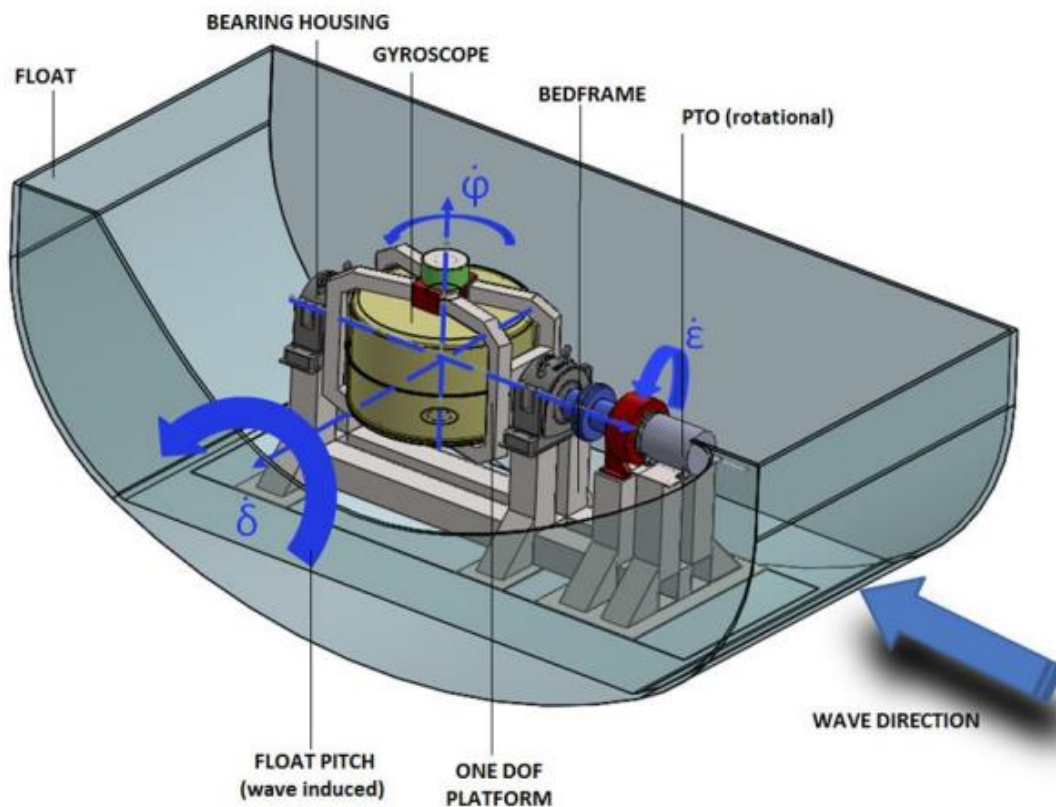


FIG. 9.1 Schema interno dell'ISWEC

Come si può osservare dalla FIG. 9.1, il moto periodico delle onde induce un moto periodico di beccheggio sullo scafo, che provoca, a sua volta, un moto di rotazione alternato dell'albero del PTO.

Da quanto illustrato riguardante il principio di funzionamento, appare evidente che la modellazione matematica di ISWEC prevede la simulazione accoppiata di fenomeni elettromeccanici a fenomeni idrodinamici, perché durante l'operatività del sistema il flusso di potenza dell'onda viene convertito in moto dello scafo, il cui effetto (combinato con la dinamica del gruppo giroscopico) genera il moto relativo rotore/statore nel generatore elettrico e la conseguente generazione di potenza elettrica uscente. Le azioni meccaniche prodotte dal gruppo giroscopico influenzano, però, a loro volta la dinamica dello scafo che risulta soggetto sia alle azioni dell'onda del mare che alle azioni del gruppo meccanico di conversione dell'energia installato a bordo.

Per questo motivo la modellazione matematica riguarda due “macro sistemi” e precisamente quello elettromeccanico e quello idrodinamico.

L'idrodinamica di uno scafo galleggiante è un fenomeno non lineare. E' possibile semplificare il comportamento idrodinamico di uno scafo linearizzandolo, tramite un integrale di convoluzione operando nel dominio del tempo oppure tramite la seguente equazione differenziale:

$$(M + A(\omega)) \cdot \ddot{X} + B(\omega) \cdot \dot{X} + K \cdot X = F_E + F_L \quad (1.27)$$

Dove: M è la matrice di massa del dispositivo, A è la matrice di massa aggiunta che tiene in conto della massa d'acqua trascinata dallo scafo nel suo movimento, B è la matrice di smorzamento, che tiene conto delle azioni dissipative dovute all'onda radiata, K è la matrice di rigidità idrostatica.

Le matrici A e B non sono costanti ma funzioni della pulsazione ω dell'onda in ingresso. Il vettore X contiene i sei gradi di libertà dello scafo: avanzamento, deriva, affondamento, rollio, beccheggio e imbardata.

Lo scafo è soggetto a due risultanti di Forze esterne, F_E che rappresenta le forze esercitate dalle onde sullo scafo e F_L che rappresenta le reazioni che il sistema giroscopico applica allo scafo. Entrambe le forzanti sono funzione della pulsazione ω dell'onda che investe lo scafo stesso.

Il comportamento del giroscopio è descrivibile dall'equazione differenziale non lineare:

$$I\ddot{\epsilon} - R\dot{\phi}\dot{\delta} \cdot \cos(\epsilon) + (I - R) \cdot \dot{\delta}^2 \cdot \sin(\epsilon)\cos(\epsilon) = T_\epsilon \quad (1.28)$$

Dove: T_ϵ rappresenta la coppia scambiata tra gruppo giroscopico e generatore elettrico, il cui controllo prevede la seguente legge:

$$T_{\varepsilon} = k\varepsilon + c\dot{\varepsilon} \quad (1.29)$$

I parametri del sistema su cui è possibile intervenire per la regolazione del sistema sono:

1. c : smorzamento torsionale imposto all'albero del generatore;
2. k : rigidità torsionale imposta all'albero del generatore;
3. $\dot{\varphi}$: velocità di rotazione del giroscopio.

L'output principale del sistema è rappresentato dalla potenza nominale sviluppata, che viene massimizzata dalla logica di controllo. La condizione ottimale di funzionamento si raggiunge nella condizione di risonanza, in corrispondenza della quale la potenza estraibile risulta essere:

$$P = \frac{1}{2} J \dot{\varphi} \omega^2 \delta_0 \varepsilon_0 \quad (1.30)$$

Dove i simboli indicano:

- P : potenza nominale teoricamente estraibile
- J : momento d'inerzia del giroscopio
- $\dot{\varphi}$: velocità angolare del giroscopio
- $\omega = 2\pi/T$: pulsazione dell'onda, con T periodo caratteristico dell'onda
- δ_0 : ampiezza dell'oscillazione a beccheggio dello scafo
- ε_0 : ampiezza di oscillazione del gruppo giroscopico

Il modello matematico finora illustrato è stato implementato da ENEA in ambiente Matlab – Simulink. Tramite l'utilizzo del software è stato possibile simulare il comportamento del sistema, l'effetto dei parametri di regolazione e stimare l'energia prodotta al variare dei parametri del moto ondoso.

Il dispositivo di produzione dell'energia ISWEC necessita, per il relativo funzionamento, di elevate rotazioni di beccheggio dello scafo all'arrivo dell'onda e di elevate rotazione "ε" del gruppo giroscopico lungo il singolo grado di libertà di cui è dotato. Questi moti influenzano direttamente la potenza estraibile dal moto ondoso e la potenza generata dal sistema. È, quindi, cruciale l'analisi della relazione tra la risposta del sistema e lo stato del moto ondoso incidente sullo scafo.

La risposta del sistema è legata a due parametri principali:

- la dimensione longitudinale dello scafo rapportata alla lunghezza d'onda;
- la frequenza propria di oscillazione del sistema di conversione "scafo+dispositivo", rapportata alla frequenza dell'onda incidente sullo scafo.

La potenza in ingresso al sistema, per un assegnato stato di moto ondoso (potenza disponibile quindi alla trasformazione), è sempre direttamente proporzionale alla dimensione trasversale dello scafo lungo il fronte d'onda.

Da queste considerazioni si evince come, a valle dell'analisi del moto ondoso prevalente presso il sito di installazione e della taglia di potenza scelta, sia possibile procedere alla determinazione delle principali specifiche relative al sistema galleggiante e alla scelta dei parametri dimensionali del sistema giroscopico, attraverso l'utilizzo dei modelli matematici sopra illustrati.

Nella fase di progettazione esecutiva del prototipo e di tutti i componenti accessori, particolare attenzione è stata dedicata alla riduzione dei consumi del sistema giroscopico ovvero alla dissipazione del volano rotante.

Questa dissipazione è in funzione fondamentalmente di due parametri:

- la sua distribuzione di massa;
- la sua velocità di rotazione.

È stato inoltre necessario determinare la tipologia di cuscinetti e il grado di vuoto da realizzare nel sistema di contenimento del giroscopio al fine di minimizzare la potenza dissipata. In fine sono stati progettati e realizzati da ENEA i sistemi di vincolo al fondale e le modalità di varo del sistema.

Le attività principali del progetto sono state quelle di:

- definizione del punto di progetto in funzione delle caratteristiche del moto ondoso del sito di installazione;
- verifica di adattabilità del sistema di conversione dell'energia a diverse lunghezze d'onda tramite un'opportuna logica di controllo del generatore elettrico e della velocità angolare del giroscopio;
- ricerca della frequenza per cui si massimizza la risposta del sistema in modo da "sintonizzare" il sistema sull'onda in ingresso;
- minimizzazione dei consumi del sistema giroscopico; l'utilizzo di una architettura giroscopica particolare (con cuscinetti a basso attrito e tecnologia del vuoto), unita a una corretta logica di gestione della velocità angolare, permette di minimizzare i consumi energetici;
- sviluppo di logiche di controllo idonee all'applicazione e adattabili alla logica "wave by wave" in modo da massimizzare la potenza prodotta tramite il monitoraggio in tempo reale.

Le principali caratteristiche del dispositivo, ricavate tramite simulazioni software, sono:

- la larghezza dello scafo è circa pari a 10 metri, considerando che nel punto di progetto (Pantelleria) la densità massima di potenza dell'onda è pari a 17 kW/m;
- la lunghezza ottimale dello scafo è stata calcolata essere pari a 1/3 della lunghezza d'onda e nel caso specifico con una lunghezza di 15 metri (corrispondente a 1/3 della lunghezza dell'onda di un'onda con periodo T

- di 5.5 secondi), si riesce a contenere il costo dello scafo ed ottenere buone prestazioni in un ampio intervallo di periodi d'onda e di tempo nell'anno;
- l'altezza dello scafo, noto il vincolo sulle dimensioni e sulla collocazione del giroscopio, è stata posta pari ad un valore di 5 metri, per consentire anche l'eventuale collocazione di zavorre, da utilizzarsi per modificare la frequenza naturale di beccheggio dello scafo e quindi il corrispondente periodo di massima risposta del sistema (nel definire l'altezza si è tenuto presente che lo scafo non debba affondare eccessivamente, altrimenti vi è il rischio che le onde alte riescano a superare lo scafo);
 - la potenza nominale P (si veda la formula 1.30) calcolata è di 60 kW, che si stima possa essere maggiorata di un 60% e arrivare fino a 95 kW in condizioni favorevoli di utilizzo;
 - la pulsazione ω , corrispondente ad un periodo dell'onda (T) di 6.7 sec, è pari a 0.94 rad/s;
 - l'ampiezza di beccheggio δ_0 è stata calcolata pari a 4° ;
 - l'ampiezza di oscillazione ε_0 è di 60° ;
 - il momento angolare del giroscopio, una volta fissati i parametri precedenti, è stato ottenuto con la seguente equazione:

$$J\dot{\varphi} = 2P/(\omega^2 \delta_0 \varepsilon_0) = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s} \quad (1.31)$$

- le altre grandezze del giroscopio, derivano tutte dal calcolo del momento angolare dello stesso, e in particolare sono stati ricavati: un raggio interno di 1.125 metri, un raggio esterno di 1.5 metri, un'altezza di 1.5 metri e una velocità angolare $\dot{\varphi}$ di 750 rpm;
- il PTO (Power Take Off) è un dispositivo di conversione dell'energia meccanica che, nel caso studio, è risultato essere un generatore elettrico multipolare a magneti permanenti. La coppia massima del PTO (C_{max}), è un parametro molto importante per l'ottimizzazione dell'estrazione di

potenza, perché consente di sfruttare al massimo l'energia in ingresso ma d'altra parte fa anche lievitare i costi della macchina elettrica), per tali ragioni, si è stabilito un valore della C_{max} pari a 260 kNm.

Questi parametri di funzionamento ottimali in grado di massimizzare la potenza generata (in particolare il momento angolare del volano e le dimensioni dello scafo) sono stati ottenuti, dai laboratori di ENEA, sulla base di una serie di simulazioni analitiche e di tipo software, per diverse condizioni di mare, cioè al variare del *Wave climate* del sito di Pantelleria.

Come già detto, il sistema di conversione dell'energia è costituito da due parti principali: il giroscopio ed il generatore elettrico multipolare a magneti permanenti. Durante la fase di progettazione meccanica, particolare attenzione è stata rivolta, quindi, al dimensionamento del giroscopio e del volano del generatore elettrico, oltre che agli schemi di montaggio di questi due elementi, cercando sempre un trade-off tra efficienza operativa e costo dell'opera.

Dalle conclusioni tratte dagli esperti ENEA, si capisce che mediante una fase di ottimizzazione delle prestazioni è possibile individuare e quantificare i margini di miglioramento del dispositivo di conversione, analizzando i costi/benefici derivanti dalla taglia degli elementi costituenti il sistema (PTO, volano, giroscopio, cuscinetti, scafo ecc...). L'ottimizzazione si basa sulla taratura dei parametri di controllo del sistema (in particolare di $J\dot{\phi}$) e nella verifica del rispetto dei limiti fisici imposti. La mappa di ottimizzazione consente inoltre di definire una logica di controllo del sistema basata sia sulle previsioni dello stato di mare a breve e medio termine effettuate da ENEA, sia sulle simulazioni dei modelli previsionali a breve termine effettuate dal Centro Meteo italiano.

Ad oggi, il dispositivo ISWEC progettato dall'ENEA è in funzione nell'isola di Pantelleria, dopo essere stato varato il 21 ottobre del 2014.

La sua realizzazione commerciale ha visto l'impiego dei seguenti componenti fondamentali:

- Generatore e motore elettrico by Siemens;
- Moltiplicatore di velocità by Desch;
- Cuscinetti in olio by SKF;
- Sistema di controllo by National Instruments;
- Inverter di potenza by Siemens;
- Banco di supercondensatori by Maxwell Technologies.

Dai dati registrati in loco, questo sistema di conversione dell'energia è stato in grado di garantire una produttività di ben 240 MWh/anno con soli 10 unità di dispositivi; che è molto più di quanto si aspettavano i tecnici di ENEA in fase progettuale. Questo dato ha entusiasmato tutti coloro che sono stati coinvolti nelle varie fasi di realizzazione del progetto ISWEC, ovvero i dipendenti di ENEA ma anche i tanti studenti e Professori del Politecnico di Torino. È grazie a questi risultati soddisfacenti che gli ideatori del dispositivo ISWEC intendono convincere finanziatori pubblici e privati ad investire sostanziose risorse nello sviluppo e nella crescita del progetto, affinché esso possa raggiungere lo stadio della commercializzazione.



FIG 9.2 Foto del dispositivo ISWEC durante le operazioni di vara a Pantelleria



FIG 9.3 Foto del giroscopio, nel cantiere navale di Messina.

CAPITOLO 10: L'IMPATTO AMBIENTALE IN GENERALE

Nei capitoli precedenti abbiamo introdotto solo alcune delle tecnologie di conversione, non tutte ovviamente, bensì le più studiate e con il maggiore potenziale per essere introdotte su mercato, cioè per essere commercializzate.

Ognuna di esse, presenta vantaggi e svantaggi dal punto di vista ingegneristico, energetico ed economico, ma un fattore, di cui ancora non si è discusso, è l'impatto che, questi dispositivi di conversione, hanno sull'ambiente che li circonda.

L'impatto delle attività umane sull'ambiente non sempre si può verificare rapidamente (nel giro di pochi decenni) ed inoltre non è facile fare delle previsioni accurate su quali possano essere le conseguenze di queste attività.

In generale, per stimare gli impatti ambientali di questi dispositivi, sono necessari studi a lungo termine che richiedono una conoscenza minuziosa dell'ambiente marino che, ad oggi, sembra non esserci (a differenza dell'ambiente terrestre). Questi studi a lungo termine, necessari per un adeguato approfondimento, sono assai costosi e complessi, specialmente per quanto concerne le acque profonde degli oceani. Il potenziale impatto ambientale di questi sistemi, attualmente, risulta piuttosto incerto e non dettagliatamente approfondito, e ciò è dovuto al fatto che si tratta, appunto, di tecnologie ancora in fase di sperimentazione di cui solo pochi dispositivi hanno beneficiato di un'effettiva realizzazione.

L'impatto ambientale riguarda tutti i cambiamenti chimico-fisici e socio-ambientali che possono verificarsi in prossimità dei siti in cui sono installati gli impianti di tipo WECs (*Wave Energy Converters*).

I principali fattori di cui tener conto per valutare l'impatto ambientale in acque costiere e oceaniche sono:

- sicurezza delle rotte navali e mercantili;
- movimenti in mare di natura militare;
- sicurezza dei rifornimenti;
- mutamenti nel moto ondoso e nella mobilità dei sedimenti;
- posizionamento dei cavi di collegamento alla rete elettrica;
- attività di pesca.

Secondo gli esperti del settore, una programmazione specifica che consenta l'individuazione di aree di "non sviluppo" dovrà essere affrontata in un futuro molto prossimo e da tutti quei Paesi che desiderino avvalersi di tecnologie per lo sfruttamento delle onde.

Gli organi militari, per esempio, hanno esigenze particolari di accesso e dislocamento, oltre a dei siti designati per i loro test; hanno anche il problema di specificare la posizione di aree "vietate" in relazione alle informazioni che intendono rendere di dominio pubblico. Bisogna, poi, considerare anche i rischi per la navigazione delle imbarcazioni, che dipendono dal tipo di installazione: se galleggiante oppure ancora al terreno; in modo tale da tenere lontano dalle principali rotte commerciali solamente quei dispositivi "a rischio".

Molti degli effetti causati dai sistemi di conversione dell'energia da moto ondoso coincidono con quelli di altre strutture marine già studiati e approfonditi nel corso degli anni, ma altri sono del tutto esclusivi legati al tipo di ancoraggio, al tipo di dispositivo e alla riduzione di energia del sistema marino. L'avanzare della ricerca e dello sviluppo di questi dispositivi comporta la "scoperta" di effetti che dovranno essere capiti e studiati col tempo, per ottenere un'energia rinnovabile davvero pulita e un ambiente marino sano.

CAPITOLO 11: FATTORI DI STRESS AMBIENTALE

Per fattori di stress, in questo caso specifico, si intendono le caratteristiche dell'ambiente che possono mutare attraverso l'introduzione di dispositivi di sfruttamento delle energie rinnovabili, nelle fasi di: installazione, funzionamento e smantellamento dei sistemi.

I ricettori, invece, sono tutti gli elementi dell'ecosistema che possono subire potenzialmente un'alterazione dai fattori di stress.

Ogni dispositivo di conversione (non solo WEC) contribuisce a creare un certo stress all'ambiente. La quantità di stress generata è proporzionale alla grandezza del dispositivo ed al numero di dispositivi nel caso si voglia creare un parco marino. Ciascun tipo di fattore di stress manifesta degli "effetti" sui recettori che possono essere singoli o multipli, a breve o lungo termine.

Bisogna fare una distinzione tra le parole "effetto" e "impatto", perché anche se spesso vengono usate come sinonimi, in realtà hanno significati differenti; "effetto" non esprime una grandezza o un'intensità, mentre "impatto" implica la gravità e la durata dell'effetto.

I principali fattori di stress per i recettori marini sono:

- **Energia assorbita dalle onde:** tutti i WECs assorbono una porzione di energia dal moto ondoso e ciò comporta una condizione di mare "calmo" dopo che lo spettro di onde ha attraversato il dispositivo. Anche se questa condizione di maggiore quiete può essere considerata un beneficio per le attività umane, non lo è, invece, per gli habitat marini, specialmente quelli più sensibili. Una riduzione antropica dell'energia delle onde potrebbe modificare la natura delle coste e dei bassi fondali oppure danneggiare la flora e la fauna presente nell'habitat marino. In generale tutte le zone

costiere fino a 100 m di profondità sono ecologicamente produttive e mantengono numerose specie animali, senza le quali si avrebbero pesanti ripercussioni sul commercio ittico e sulla biodiversità delle specie. Il problema dell'energia assorbita in prossimità della costa riguarda specialmente i dispositivi di tipo Near-to-Shore e gli Overtopping Device, che riflettono o convogliano grandi quantità d'acqua.

- **Emissione di sostanze inquinanti:** la conversione dell'energia da moto ondoso attraverso i sistemi elencati *non emette alcuna sostanza inquinante* in forma gassosa, liquida o solida durante il normale funzionamento. Anche in caso di guasti o anomalie, le uniche perdite riguarderebbero sostanze liquide lubrificanti, le quali possono essere fortemente limitate se segnalate con tempestività da un eventuale sistema di controllo.
- **Presenza fisica dei dispositivi:** l'esistenza stessa della struttura di un WEC, ma anche di qualsiasi altro sistema di conversione, implica diversi effetti sui recettori biologici che possono essere sia positivi sia negativi. Le strutture, per esempio, possono essere usate dagli uccelli per posarvi sopra; inoltre le luci di posizione possono attirare volatili e pesci, i quali possono anche ferirsi colpendo le parti sporgenti. Il sistema di ancoraggio dei dispositivi può essere d'intralcio alle rotte dei pesci, oppure può causare, involontariamente, la loro cattura (ghost fishing). In altre parole le attrezzature installate in ambiente marino possono comportare dei cambiamenti all'habitat non solo faunistico. I cambiamenti principali riguardanti la flora dell'habitat marino sono dovuti alla caduta dei residui lasciati dal "marine fouling" cioè dalle incrostazioni che ricoprono la superficie del macchinario e dell'ancoraggio, a contatto con l'acqua.
 - Soluzioni: per ridurre l'impatto delle strutture in superficie si può cercare di sommergerle il più possibile, riducendo in tal modo il numero di ostacoli per i volatili. Per quanto riguarda, invece, il

sistema d'ancoraggio, è importante monitorare la zona sommersa, in modo tale da valutare la creazione di possibili aggrovigliamenti di alghe sulle corde che possono intrappolare i pesci di passaggio.

- **Emissioni acustiche:** il rumore prodotto dai dispositivi di captazione del moto ondoso, per alcune tecnologie, può essere notevole, non solo durante la fase di installazione ma anche durante il funzionamento regolare. Le emissioni acustiche si possono trasmettere anche per lunghe distanze generando disturbi alla navigazione e alla fauna marina (foche, delfini e balene). Anche le emissioni acustiche subacquee possono essere causa di disturbi ambientali, infatti, diversi animali marini (in particolare cetacei e crostacei) utilizzano i suoni subacquei per regolare i propri bioritmi di vita: e quindi l'interazione con il rumore emesso da taluni dispositivi può essere una problematica. Esistono numerose sorgenti di rumore per ciascun dispositivo WEC, infatti, si parla di sorgente multipla del rumore; si parte dal rumore dei generatori e turbine (se eventualmente presenti) fino ad arrivare al rumore generato dalle onde sul dispositivo. Il rumore generato da questi sistemi è principalmente a bassa frequenza, per tale ragione mammiferi marini, come le balene, che sono più sensibili alle basse frequenze, risentono maggiormente di questo fattore di stress. I suoni possono avere effetti opposti, ovvero possono attrarre gli animali o respingerli, costringendoli a cambiare le proprie rotte migratorie e rendendoli maggiormente esposti ai predatori. È comunque possibile che durante le tempeste marine o con il mare agitato, il rumore generato dai dispositivi non venga nemmeno percepito dalla fauna, perché mascherato dal rumore di fondo delle onde, che ha un *valore medio di circa 90 dB*.
 - Soluzioni: per mitigare il rumore si possono variare i cavi di ancoraggio dei dispositivi facendo in modo che non producano rumori sincroni a basse frequenze, oppure includere nel progetto

del dispositivo dei sistemi di assorbimento del rumore interno come ad esempio dei pannelli fonoassorbenti.

- **Emissioni elettromagnetiche:** i campi elettromagnetici (EMF, Electro Magnetic Fields) comprendono sia campi elettrici che magnetici. Il campo elettrico è interamente contenuto dall'isolamento e dalla schermatura dei cavi e dei generatori utilizzati mentre il campo magnetico esce dalla fonte che lo genera e si richiude su se stesso con delle linee chiuse. Il campo magnetico può generare, quindi, un campo elettrico indotto, qualora esso sia attraversato da animali, che fungono da "conduttori". Il campo elettrico galvanico, invece, è causato dall'interazione elettrochimica dei metalli a contatto con l'acqua di mare, che agisce da elettrolita. Tutti i dispositivi per la captazione dell'energia ondosa ed i relativi cavi elettrici marini sono fonti di campi elettromagnetici. Il campo elettrico indotto e galvanico possono modificare il comportamento degli animali che usano i campi elettrici per procurarsi cibo (ad es. squali, granchi, storioni, tonni e alcuni uccelli marini). Il campo magnetico invece può influenzare il movimento e il comportamento di alcuni animali marini che sfruttano le variazioni di intensità del campo magnetico per orientarsi durante le loro migrazioni. Non si è, ancora, in grado di capire se le specie più sensibili possano essere attratte o respinte dai campi generati e se i loro comportamenti possano essere modificati o no. Tuttavia gran parte degli studi effettuati da alcuni biologi, sulle conseguenze dell'esposizione da parte delle specie marine ai campi elettromagnetici, non hanno evidenziato significative conseguenze per la loro vita. Gli EMF generati sono percepibili solo in prossimità del dispositivo o del cavo, dato che altrove i campi magnetici ed elettrici sono fin troppo deboli perché vi siano degli effetti significativi sugli organismi; per questa ragione ad essere maggiormente colpite sono le comunità pelagiche che si formano attorno al dispositivo.

- Soluzioni: relativamente al campo magnetico generato dai cavi, il problema può essere arginato interrando i cavi stessi, oppure si può pensare di convertire la corrente alternata da asincrona a meno di 1 Hz a sincrona a 60 Hz (riducendo il campo magnetico); inoltre si possono prevedere un'adeguata schermatura del cavo elettrico e l'applicazione di gabbie di Faraday al generatore.

- **Impatto sulla navigazione:** I dispositivi mobili galleggianti, possono rappresentare un grosso pericolo per la navigazione marittima e le attività di pesca, in quanto risultano difficili da individuare a vista o tramite radar.
 - Soluzioni: occorre una precisa registrazione tramite GPS delle posizioni esatte in cui sono presenti dispositivi WEC, in modo da fornirne un'adeguata segnalazione nelle carte marine o nei moderni software per navigatori.

CONCLUSIONI PERSONALI

Le risorse rinnovabili marine possono costituire una fonte rilevante d'energia presente e futura, inoltre possono avere un impatto significativo sulle modalità di trasformazione, di trasporto e di utilizzazione dell'energia.

Il potenziale energetico connesso a queste attrezzature e le metodologie di sfruttamento, però, non sono stati ancora sviluppati pienamente e la causa è da imputarsi, soprattutto, alla mancanza di fondi.

L'ambito di forze, descritto nella FIG. 12.1, mostra come vi siano attualmente meno forze di spinta che forze di resistenza in riferimento al progresso dello sfruttamento energetico del mare. Per assicurare il successo industriale e commerciale dei dispositivi, descritti in precedenza, occorre che le forze di spinta col tempo vadano a rafforzarsi sempre di più e che quelle di resistenza vengano eliminate o il più possibile attenuate.

GENERAZIONE ELETTRICA DA FONTI RINNOVABILI

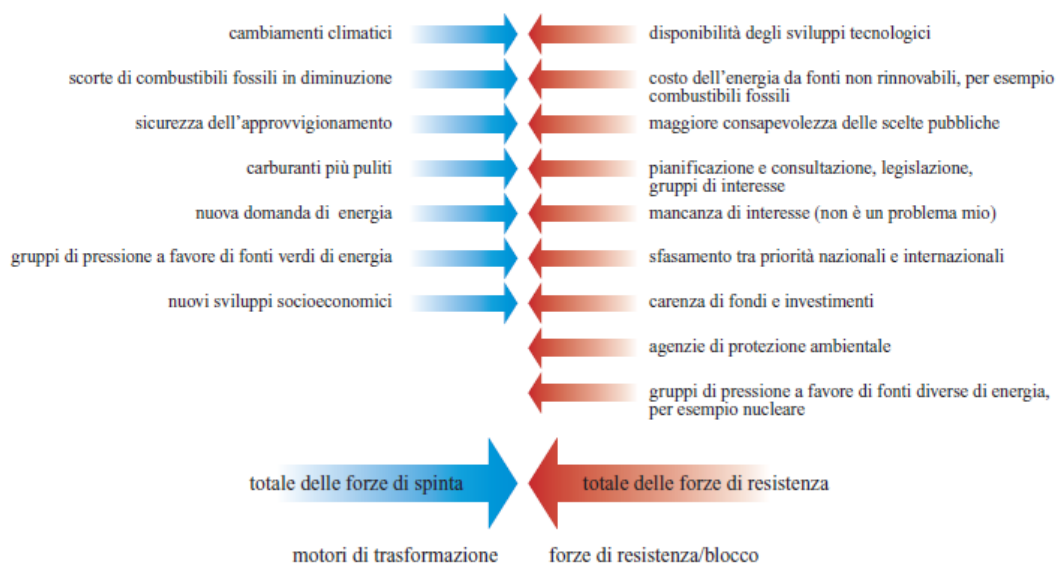


FIG. 12.1 Diagramma delle forze agenti

Con l'aumento della popolazione mondiale e le crescenti esigenze *pro capite* di energia, la richiesta di elettricità è più alta che mai e, in particolare, il mercato delle energie rinnovabili è in costante crescita. Nell'*International energy outlook 2004* (EIA, 2004) è stata formulata la seguente previsione: «Ci si aspetta che tra il 2001 e il 2025 il consumo mondiale totale di energia sul mercato si espanda del 54%». Le fonti rinnovabili d'energia marina hanno la capacità potenziale di fornire immense quantità di energia. Gli attuali progetti, sia italiani che mondiali, hanno lo scopo di dimostrare la fattibilità di questi sistemi di conversione, e stanno “aprendo la strada” a degli sviluppi importanti nel futuro. Potrebbero essere, infatti, necessari dai 10 ai 15 anni per raggiungere uno stadio di sviluppo tale da poter qualificare le fonti energetiche marine come fonti energetiche privilegiate. Queste fonti alternative di energia potrebbero potenzialmente rappresentare il “volano” dell'economia del futuro, oltre che costituire la base per un domani più pulito, rinnovabile e sostenibile.

Il futuro dell'energia, o meglio della sua distribuzione, sembra avere un solo nome: *Smart Grid*. È, infatti, questo il sistema che, secondo gli esperti a livello globale, permetterebbe di rispondere in modo flessibile a tutti i flussi dinamici dell'energia e di adattarsi al ruolo sempre più attivo dell'utenza, che partecipa anche alla fase di approvvigionamento dell'energia.

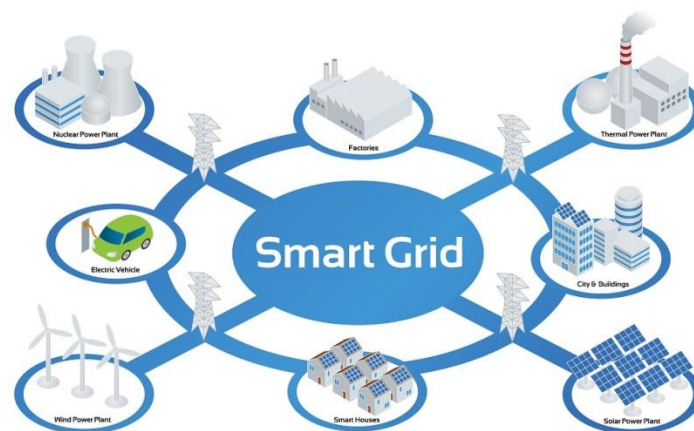


FIG 12.2 Esempio di un settore di una rete organizzata a Smart Grid

I centri di conversione dell'energia non dovranno più essere mastodontici e isolati, lontano da occhi indiscreti, bensì il più vicino possibile alle utenze (domestiche o industriali), cioè dislocati in centri più piccoli e distribuiti nei vari settori della rete in corrispondenza degli agglomerati urbani.

Allo stato attuale delle cose, però, è impensabile creare in Italia una rete nazionale organizzata con Smart Grid per due principali motivi:

- il costo elevato di un kWh di energia prodotto da fonti rinnovabili, a causa dello scarso sviluppo delle attuali tecnologie nonché del crollo del prezzo delle fonti fossili;
- la scarsa affidabilità del servizio offerto, poiché tali fonti energetiche mancano di regolarità e di prevedibilità, essendo soggette a cicli naturali tutt'altro che costanti.

Il presente progetto di Tesi ha voluto porre l'accento marcato sulla validità della soluzione proposta come nuova fonte di energia alternativa. Ancora oggi, infatti, i sistemi di conversione dell'energia da moto ondoso, occupano un ruolo troppo marginale nei Piani energetici nazionali. Fin dai primi sviluppi (sia a livello, mondiale che europeo), il settore dei dispositivi WECs ha suscitato scarso interesse da parte dei centri di ricerca in Italia; ed è, quindi, poco conosciuto.

Stando a quanto è stato esposto, le tecnologie in grado di trasformare l'energia imprigionata nel moto ondoso offrono una grande versatilità, potendosi adattare sia alle condizioni di mare aperto sia a quelle sulla costa (chiaramente con efficienze differenti). Gran parte di questi sistemi sono in grado di "lavorare" in ambienti complessi e delicati (come ad esempio isole turistiche o parchi protetti) senza dover necessariamente deturpare l'ambiente stesso.

Collegandosi all'idea futuristica di Smart Grid, gli impianti che sfruttano il moto ondoso del mare potrebbero fornire, in Italia, la fetta più grossa della produzione elettrica settoriale; visto e considerato che lo sviluppo costiero della penisola italiana e delle sue isole è circa pari a 7460 km lineari con un numero di porti e dighe superiore a 690.

La principale barriera allo sviluppo del settore è di tipo economico: lunghi ritorni degli investimenti compiuti, limitati accessi ai finanziamenti di tipo pubblico e percezione elevata di rischio di investimento rendono difficoltosa l'ascesa in commercio di queste fantastiche tecnologie.

A risentirne maggiormente di questo problema, sono gli studi di ricerca nel settore della "Blue Economy" (ad eccezione dell'ENEA), che rappresentano la linfa vitale per lo sviluppo delle attuali (limitate) tecnologie.

L'Italia si sa, è un paese molto povero di risorse energetiche fossili, e quindi perché non puntare sugli sviluppi della "Blue Economy"?

Ulteriori domande, o meglio critiche, che sorgono spontanee sono le seguenti:

Perché, in Italia, si preferiscono investire 5.5 miliardi di Euro in un'opera tanto mastodontica quanto discutibile come il *Mose*, anziché devolvere gran parte di questi soldi pubblici in Ricerca & Sviluppo delle tecnologie citate in questo ed altri lavori di Tesi?

Perché, in Italia, si preferiscono investire 5.5 miliardi di Euro in un'opera che tenta invano di emulare il profeta biblico (da cui deriva anche il nome) anziché favorire con ogni mezzo la crescita significativa dei nuovi impianti di produzione di energia elettrica dal mare, magari proprio nella Laguna veneta?

Questi e molti altri dubbi affollano la mente di chi ha conosciuto e "toccato con mano" le enormi potenzialità di tali tecnologie, e nonostante sia consapevole che la strada da percorrere è ancora lunga, vive nella speranza di un domani più "Blu".

BIBLIOGRAFIA

A.Bargagli, A.Carillo, V.Ruggiero, P.Lanuacara, G.Sannino, *Modello di onde per l'area mediterranea* (report RDS 026/2011).

A.Carillo, A.Bargagli, E.Caiaffa, R.Iacono, G.Sannino, *Stima del potenziale energetico associato al moto ondoso in regioni campione della costa italiana*, (report RDS 170/2012).

Chakrabarti S.K. *Hydrodynamics of offshore structures*, Southampton, Wit Press, (1988).

Clément A. et al., *Wave energy in Europe: current status and perspectives*, «Renewable and Sustainable Energy Reviews», 6, 405-431, (2002).

Davies P.G. *Wave energy. The Department of Energy's R&D Programme 1974-1983*, UK Department of Energy-Energy Technology Support Unit, (1985).

EIA (US Energy Information Administration), *International energy outlook 2004*, Washington (D.C.), EIA, (2004).

European Wave Energy symposium, *proceedings of an international symposium held in Edinburgh, Scotland, 21-24 July 1993*.

Evans D.V., *Some analytic results for two and three dimensional wave-energy absorbers*, in: *Power from sea wave: based on the proceedings of a conference on power from sea waves, organized by the Institute of mathematics*, East Kilbride (UK), (1994).

G.Mattiazzo, *ISWEC: varo del sistema in scala reale nel mare di Pantelleria*, (Dicembre 2014).

G.Sannino, A.Bargagli, A.Carillo, E.Caiaffa, E.Lombardi, P.Monti, G.Leuzzi, *Valutazione del potenziale energetico del moto ondoso lungo le coste italiane* (report RDS 151/2011).

George W. Boehlert, R. McMurray, Cathryn E. Tortorici, *Ecological Effects of Wave Energy Development in the Pacific Northwest*, a scientific workshop October 11-12, 2007.

Heath T., *The design, construction and operation of the LIMPET energy converter (Islay, Scotland)*, in: *Proceedings of the 4th European Wave Energy conference*, Aalborg (Denmark), 4-6 December, (1980).

T.Crescenzi, D.Nicolini, A.Fontanella, L.Sipione, *Caratteristiche costruttive dei sistemi OWC*, (report RDS 086/2013).

The Carbon Trust, *Oscillating Water Column Wave Energy Converter*, evaluation Report, 2005.

SITOGRAFIA

Il problema energetico nella storia. <http://www.ecoage.it>

Bilancio energetico della terra e clima. <http://www.aeronautica.difesa.it>

Tehani Montaron. Reesport OPT Wave Park Plans Terminated, 6 maggio 2014.
<http://tethys.pnnl.gov>

Oyster 2 Wave Energy Project, Non-technical Summary.
<http://aquamarinepower.com>

Pelamis Wave Power. <http://www.emec.org.uk>

Prospettive di sviluppo dell'energia dal mare per la produzione elettrica in Italia.
<http://www.enea.it>

Energia marina, attualità e prospettive. <http://www.rinnovabili.it/energia/moto-marino>

Il moto ondoso. www.orizzontenergia.it