

INDICE

Introduzione	4
I. PARTE	9
Capitolo 1	10
Richiesta di sostenibilità	10
1.1 Lo sfruttamento di combustibili fossili	10
1.2 Il ruolo delle fonti rinnovabili di energia	15
Capitolo 2	18
L'energia rinnovabile che viene dal mare	18
2.1 Il mare come grande riserva di energia	18
2.2 Le diverse forme di energia estraibili dal mare	19
2.2.1 Energia a gradiente salino	19
2.2.2 Energia dai gradienti termici	20
2.2.4 Energia da biomassa marina	21
2.2.5 Energia dalle maree	22
2.2.6 Energia dalle correnti marine e di marea	23
2.2.7 Energia da onda	24
Capitolo 3	25
Estrazione di energia dalle onde	25
3.1 L'energia ondosa	25
3.2 Distribuzione della potenza ondosa	26
3.3 Tecnologie per la generazione di energia dalle onde	28
3.3.1 Dispositivi a tracimazione (Overtopping)	29
3.3.2 Dispositivi a colonna d'acqua oscillante (OWC)	32
3.3.3 Zattere articolate (heave surge wave devices)	35
3.3.4 Boe e galleggianti	37
3.3.5 Dispositivi a galleggiamento controllato	39
Capitolo 4	42
OWCs (Oscillating water columns)	42
4.1. Introduzione	42
4.2 On-shore OWCs	45
4.2.1 Limpet	45
4.2.2 Pico	47

4.2.3 Oceanlinx	50
4.2.4 Sakata, Japan	52
4.3 Offshore OWCs	54
4.3.1. Mighty Whale	54
4.3.2. SWEC	57
4.3.3. Sperboy	59
II. PARTE:.....	61
ATTIVITA' SPERIMENTALE CONDOTTA SUL LEANCON	61
Capitolo 5	62
Dispositivo e obiettivi preposti	62
5.1 Leancon.....	62
5.1.1 Introduzione	62
5.1.2 Principio di funzionamento	63
5.2 Obiettivi dell'attività sperimentale	67
Capitolo 6	68
Fase di acquisizione dei dati in laboratorio.....	68
6.1 Setup di laboratorio.....	68
6.2 Esecuzione delle prove	75
Capitolo 7	77
Studi preliminari sui dati acquisiti	77
7.1 Studio degli spettri di onde riflesse e di onde incidenti	77
7.2 Analisi del campo d'onda davanti e di fianco al Leancon	82
7.2.1 Analisi zero-down crossing per le sonde davanti al Leancon	82
7.2.2 Analisi zero-down crossing per le sonde di fianco al Leancon.....	84
7.3 Studio della rapidità di risposta del sistema.....	86
Capitolo 8	90
Analisi dell'efficienza del Leancon	90
8.1 Introduzione	90
8.2 Studio statistico sui dati di potenza del dispositivo in scala 1:40	90
8.3 Installazione nel porto di Cagliari.....	99
Conclusioni	110
Bibliografia	112

Introduzione

Le fonti di energia, secondo una definizione più o meno condivisa, rappresentano ciò che la natura ci ha messo a disposizione e che possiamo utilizzare (direttamente o attraverso una trasformazione) per ottenere un particolare lavoro o utilità. Fin dalla preistoria, e per gran parte della storia umana, le uniche fonti di energia utilizzabili dall'uomo furono la forza umana o animale, nonché la combustione di legno o biomassa per la produzione di calore o lavoro. 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. La densità di energia per persona tuttavia, prima del XX secolo in Occidente, era ancora ridotta: questo si traduceva, nelle società pre-industriali, in una minore mobilità delle persone nel loro complesso, minore circolazione di merci, ridotta assistenza sanitaria, disponibilità discontinua di risorse alimentari, e periodiche carestie. Oggi la presenza di numerose fonti di energia ha permesso uno sviluppo notevole di infrastrutture ed un' accelerazione del processo di industrializzazione; l'evoluzione della società umana richiede infatti un apporto di energia sempre maggiore e questo ha portato allo sviluppo di strutture estremamente sofisticate atte alla produzione di energia e al suo immagazzinamento. Nel corso del 1900 si è quindi assistito ad un notevole incremento del consumo di energia, che è praticamente raddoppiato nei trenta anni dal 1973 al 2004. Ciò pone dei problemi, sia dal punto di vista ambientale (ad esempio per l'effetto serra o lo smaltimento delle scorie), sia dal punto di vista geopolitico. La scelta di una fonte energetica è quindi diventata un fatto socio-politico complesso ed importante, che dipende dalla disponibilità di risorse, dal costo di una fonte in relazione alle condizioni particolari di una nazione, dall'affidabilità delle centrali di produzione di energia, dalla protezione dell'ambiente. La nostra società, dunque, si trova ad affrontare due sfide fondamentali: reperire ed assicurare le risorse energetiche per sostenere la crescita e lo sviluppo economico dei Paesi sviluppati e, ancor più, di quelli in via di sviluppo; mitigare i processi di cambiamento climatico in atto garantendo la protezione dell'ambiente. Trovare un equilibrio fra queste esigenze ci obbliga a realizzare una vera e propria transizione verso un sistema energetico ed uno sviluppo più sostenibile: il prezzo del fallimento potrebbe essere catastrofico. La tecnologia ci

offre gli strumenti per realizzare questa transizione; occorre la disponibilità a cambiare comportamenti e a mettere in atto politiche adeguate. Risulta pertanto sempre più necessario che acquistino un ruolo dominante tecnologie in grado di soddisfare la domanda riducendo al minimo tali pressioni, come ad esempio, le tecnologie che sfruttano fonti rinnovabili per produrre energia. In particolare si definiscono *energie rinnovabili*, quelle forme di energia generate da fonti che, per loro caratteristica intrinseca, si rigenerano o non sono "esauribili" nella scala dei tempi "umani" e, per estensione, il cui utilizzo non pregiudica le risorse naturali per le generazioni future.

Insieme alle più note energie rinnovabili, come il solare, l'eolico, l'idroelettrico o le biomasse, esiste un intero filone di tecnologie utilizzate per ricavare elettricità direttamente dal mare. A fronte dell'odierna crisi energetica, è questo uno dei settori maggiormente in corso di sviluppo, visto e considerato che i due terzi abbondanti del nostro pianeta sono ricoperti dalle acque. I mari e gli oceani del pianeta costituiscono un'immensa riserva di energia che si manifesta in molte forme. Tra queste la più conosciuta e disponibile è l'energia delle onde. Nessuno sa realmente quanta energia si possa ricavare in pratica dagli oceani, ma nel Regno Unito il Marine Foresight Panel, in un rapporto al governo, ha affermato che: "si stima che se meno dello 0,1% dell'energia rinnovabile disponibile dagli oceani 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, 1999). Si tratta chiaramente di una risorsa immensa e tanto i governi quanto l'industria privata stanno compiendo sforzi crescenti per sviluppare le tecnologie necessarie al suo sfruttamento.

Nel presente lavoro viene analizzato un convertitore di energia ondosa denominato Leancon, sviluppato dal gruppo LEANCON Wave Energy. Si tratta di un particolare MAWEC (Multi Absorbing Wave Energy Converter), OWC (Oscillating Water Column) che funziona in condizioni off-shore.

Questo studio si pone come obiettivo fondamentale quello di analizzare la potenza estraibile dal Leancon. Nello specifico, due sono le finalità del lavoro portato a compimento.

- ✓ Analizzare l'efficienza del dispositivo, sulla base di dati ottenuti da prove in laboratorio su un modello in scala 1:40 in una realistica combinazione di condizioni ondose.
- ✓ Stimare la produzione di energia annua del dispositivo, ipotizzando una sua installazione nel porto di Cagliari.

La presente tesi si articola in due parti principali ed è costituita da otto capitoli.

Nel primo capitolo viene fornito un quadro della situazione energetica a livello mondiale e, nel sottolineare i problemi legati allo sfruttamento dei combustibili fossili, viene messo in luce il ruolo delle risorse rinnovabili, come fonti energetiche alternative.

Nel secondo capitolo ci si sofferma sull'energia marina e sulla descrizione delle principali forme di energia estraibili dal mare.

Il terzo capitolo è dedicato all'energia ondosa, ed in particolare all'analisi delle principali tecnologie per la generazione di energia dalle onde, secondo una delle tante classificazioni possibili.

Nel quarto capitolo, poiché il Leancon è un dispositivo di tipo OWC, si analizzano i principali convertitori che sfruttano il medesimo principio di funzionamento.

Il quinto capitolo costituisce il primo vero capitolo della parte sperimentale della tesi, poiché in codesta sezione viene descritto il Leancon e vengono delineati gli obiettivi dell'analisi sperimentale condotta.

Il sesto capitolo è relativo alla fase di acquisizione dei dati in laboratorio, ovvero comprende la descrizione dell'assetto di laboratorio, e dell'esecuzione delle prove.

Il settimo capitolo contiene tre analisi, tutte finalizzate a comprendere il comportamento e le prestazioni del dispositivo. In particolare si studiano gli spettri delle onde riflesse e delle onde incidenti, si analizza il campo d'onda davanti e di fianco al dispositivo, si valuta la rapidità di risposta del sistema.

L'ottavo capitolo rappresenta il capitolo più significativo della tesi, poiché comprende l'analisi della potenza estraibile dal Leancon. Tale analisi prevede due studi correlati, condotti in successione: lo studio statistico sui dati di potenza del

dispositivo in scala 1:40, e la valutazione dell'energia prodotta dal dispositivo nel caso di un'ipotetica installazione nel porto di Cagliari.

I. PARTE

Capitolo 1

Richiesta di sostenibilità

1.1 Lo sfruttamento di combustibili fossili

La maggior parte dell'energia primaria consumata oggi a livello mondiale proviene dalla combustione di risorse energetiche fossili, cioè petrolio, gas naturale e carbone. Queste risorse presentano tre inconvenienti gravi, tali da compromettere irrimediabilmente la "capacità delle future generazioni di soddisfare i propri bisogni".

Un primo problema risiede nel fatto che tali risorse, in grado di coprire l'80% dell'energia mondiale (34.3%-petrolio, 20.9%-gas e 25.1%-carbone), sono esauribili. Le fonti energetiche fossili derivano da un lentissimo processo di degrado del materiale organico (circa 100 milioni di anni), mentre vengono utilizzate ad un ritmo estremamente più veloce. In 150 anni si sono consumate circa la metà delle risorse disponibili e nel corso del '900 si è assistito ad un notevole incremento dei consumi energetici mondiali, che sono pressochè raddoppiati nei trent'anni dal 1973 al 2004 (Figura 1.1). Gli esperti prevedono che il picco di estrazione del gas sarà raggiunto nel 2020, mentre valori massimi di estrazione del petrolio si avranno intorno al 2005-2010. Tuttavia, in entrambi i casi, si sono già evidenziati problemi di scarsità, resi più acuti dalla particolare distribuzione geografica delle risorse restanti, distanti dai centri di consumo e concentrate in zone politicamente "a rischio" (infatti, circa il 65 % delle risorse mondiali di petrolio sono localizzate nel Medio Oriente). Per il petrolio, ben prima che la produzione abbia raggiunto il suo massimo, c'è da attendersi una crescita dei prezzi accompagnata da fluttuazioni anche brusche. Lo stesso problema dovrebbe manifestarsi qualche decennio dopo anche per il gas. La competizione internazionale, già evidente, per risorse che diventano sempre più scarse tenderà dunque a intensificarsi e, per l'Europa, i problemi di dipendenza energetica e di sicurezza di approvvigionamento, non potranno che aggravarsi. Il carbone, la risorsa fossile globalmente più abbondante, si avvia inevitabilmente ad

essere utilizzato in maniera crescente, soprattutto fuori dall'Europa, in aree dove le disponibilità sono cospicue e la domanda energetica è in forte crescita (Cina, India, Indonesia, Sud-Africa). Il carbone costituisce, d'altro canto, un'alternativa che, in assenza di opportuni accorgimenti tecnologici, rischia di compromettere ancora di più l'ambiente; infatti, fra tutte le fonti energetiche, il carbone, a parità di resa energetica, produce più anidride carbonica (CO₂), il più importante dei gas ad effetto serra.

Nella Tabella 1.1. sono riportate le stime accertate di combustibili fossili e di Uranio, espresse in Gtoe (miliardi di tonnellate di petrolio equivalenti).

Riserve (in Gtoe = 1000 Mtoe)^[2]	Accertate	Stimate
Carbone 36% Europa; 30% Asia; 30% Nord America	700	3400
Petrolio 65% Medio Oriente; 10% Europa; 10% Centro e Sud America; 5% Nord America	150	300 (+500 non convenzionale)
Gas naturale 40% Europa; 35% Medio Oriente; 8% Asia; 5% Nord America	150	400
Uranio (²³⁵U) reattori termici 25% Asia; 20% Australia; 20% Nord America (Canada); 18% Africa (Niger)	60	250
Uranio (²³⁸U) reattori veloci	3500	15000
Energia solare per anno	130000	---

Tabella 1.1: Quantitativi di combustibili fossili e di uranio oggi disponibili.

Si tenga conto che il consumo energetico totale nel 2005 è stato di 11 Gtoe, così ripartiti: 2.7 Gtoe per il carbone, 3.8 per il petrolio, 2.3 per il gas naturale, 0.7 per il nucleare, 0.2 per l'idroelettrico, e solo 0.04 Gtoe per geotermico/solare/eolico. Secondo la tabella, quindi, con le riserve accertate di petrolio si potrebbe andare avanti per $150/3.8=39.4$, cioè circa 40 anni. Per il carbone, la durata è circa

700/2.7=260 anni. Tali stime sono in realtà ottimiste poiché non tengono conto del tasso di crescita dei consumi, circa il 2% annuo.

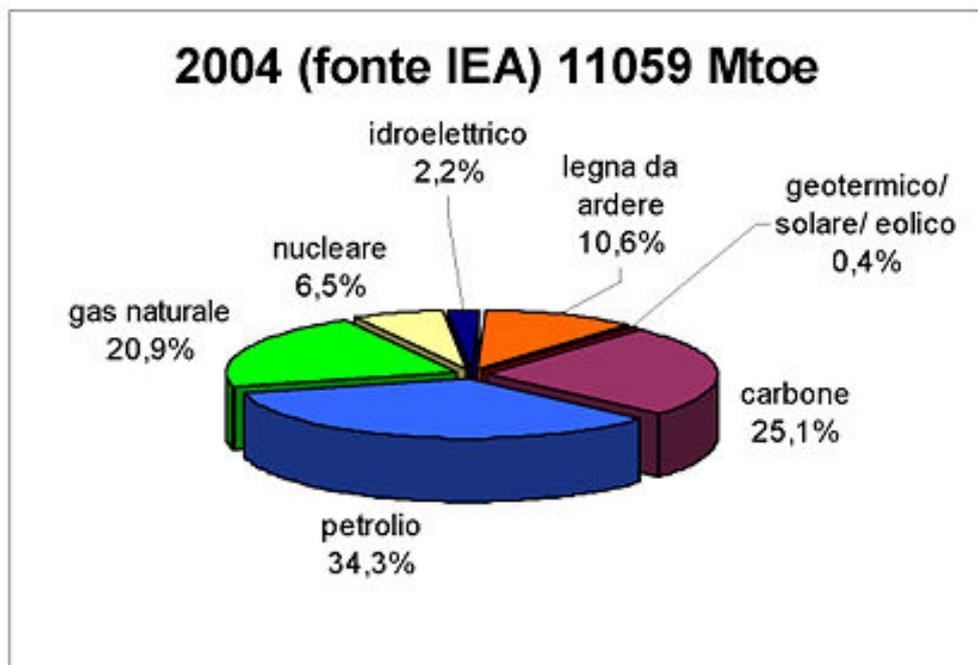
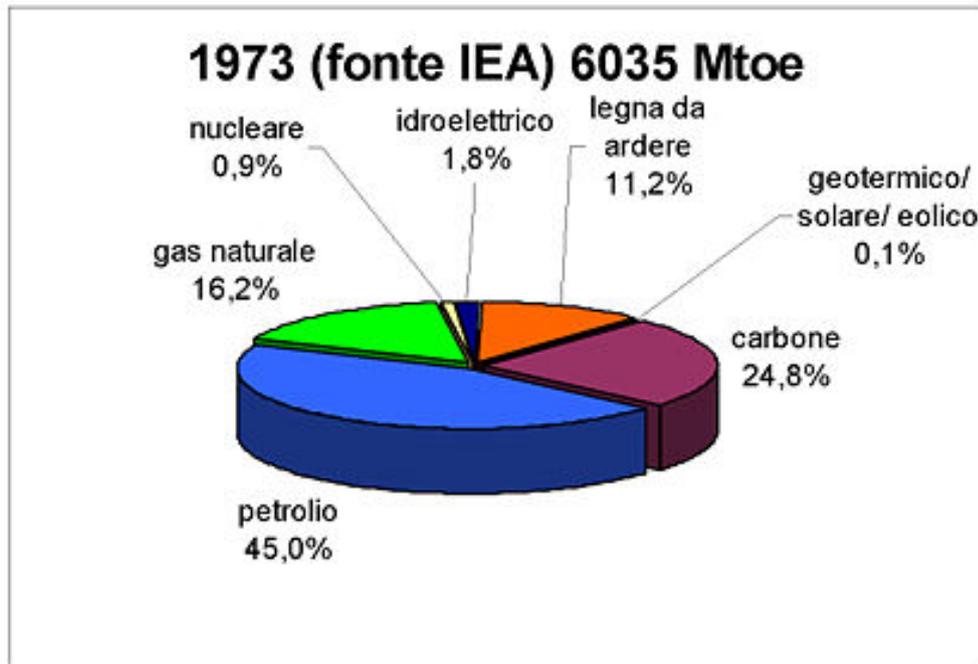


Figura 1.1 Consumi energetici mondiali, per fonte, nel 1973 e nel 2004. Fonte: International Energy Agency.

Come già accennato, un secondo problema, che si aggiunge a quello della scarsità di risorse, è legato alla particolare distribuzione geografica dei combustibili fossili sul Pianeta. I paesi "Sviluppati", pur accogliendo solo il 19% della popolazione mondiale, consumano più del 50% dell'energia mondiale. E nonostante tali paesi siano i più energivori, sono da annoverare tra quelli che dispongono di riserve più limitate. Quasi il 70% delle attuali riserve di petrolio si trova, infatti, in Medio Oriente e più del 75% delle riserve di gas naturale risulta diviso tra i paesi medio orientali ed i paesi dell'Ex Unione Sovietica (Figura 1.4), ovvero lontano dai centri di consumo ed in zone politicamente "a rischio". Tale circostanza è vissuta dai Paesi ricchi come una minaccia per la continuità dell'approvvigionamento energetico. In questo quadro le nazioni sono già in gara per l'accaparramento delle ultime riserve, e purtroppo, sempre più spesso, la guerra costituisce lo strumento privilegiato di questa strategia.

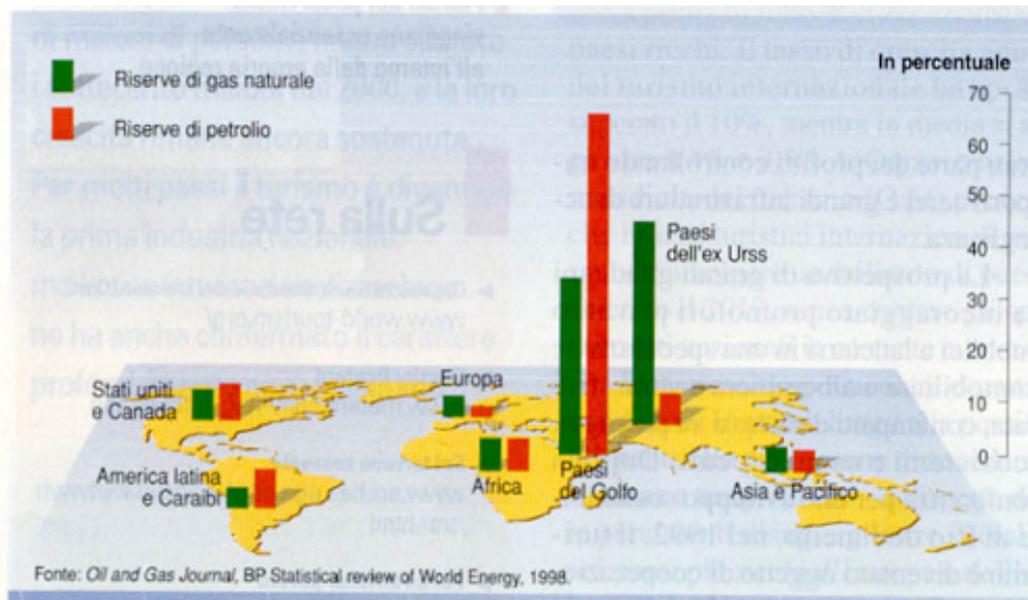


Figura 1.2 Distribuzione mondiale delle riserve di gas e di petrolio (Oil and gas Journal BP Statistical review of World Energy, 1998).

Un ultimo aspetto importante da considerare è legato alle problematiche ambientali che lo sfruttamento dei combustibili fossili comporta. La combustione di tali risorse causa, infatti, l'emissione di grandi quantitativi di anidride carbonica (CO₂), accrescendo pertanto il fenomeno dell'*Effetto Serra* e provocando conseguentemente un surriscaldamento della bassa atmosfera e della superficie terrestre. Negli ultimi

decenni ha preso sempre più piede, in ambito scientifico, la convinzione che sia in atto sul nostro Pianeta un processo di cambiamento del clima e che la combustione delle risorse fossili abbia una forte incidenza. In particolare, con il nuovo rapporto “*Climate Change 2007*”, l’autorevole Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)¹ nel confermare le indicazioni generali già presenti nel precedente rapporto del 2001, fa salire dal 66% al 90% la stima dell’incidenza del fattore antropico sull’innalzamento della concentrazione di gas serra in atmosfera. Secondo questo rapporto intervenire per contrastare le cause dei cambiamenti climatici è un impegno da assumere soprattutto nei confronti delle generazioni future, considerando che le emissioni di CO₂ oggi prodotte resteranno per circa 100 anni nell’atmosfera. Alcuni effetti dei cambiamenti climatici in corso sono già visibili e riguardano l’aumento della temperatura media del pianeta di 0.74° nell’ultimo secolo; l’incremento della frequenza di eventi estremi; l’accelerazione della crescita del livello del mare, salito di 20 cm solo negli ultimi 100 anni; la forte diminuzione delle coperture nevose e della superficie dei ghiacciai nonché fenomeni di desertificazione e riduzione o modificazione della biodiversità. Secondo Nicholas Stern², estensore di un recente rapporto commissionato dal governo britannico, le conseguenze economiche a lungo termine dei cambiamenti climatici potranno essere imponenti: dal 5 al 20% del prodotto lordo mondiale dovrà essere impegnato annualmente per rimediare ai danni provocati dai nuovi assetti climatici. Azioni tempestive di riduzione delle emissioni consentirebbero invece di ottenere una mitigazione dell’effetto dei cambiamenti climatici con un costo molto più contenuto che l’economista valuta in un ammontare pari all’1% annuo del PIL mondiale.

L’orientamento degli investimenti che saranno effettuati nei prossimi 10-20 anni avrà dunque un profondo effetto sul clima e influenzerà in misura considerevole il futuro del pianeta: i costi di stabilizzazione delle emissioni sono significativi ma supportabili, ritardare gli interventi potrebbero essere pericoloso e molto più costoso. Occorre osservare che, accanto agli investimenti per la mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici, vanno, fin da subito, realizzati quelli che consentono l’adattamento del pianeta ai danni già prodotti. Per quel che riguarda la mitigazione

¹ IPCC: costituito nel 1988 dalle Nazioni Unite come organo scientifico di supporto agli organi decisori, con il compito di valutare lo stato delle conoscenze scientifiche, tecniche e socioeconomiche su cause e conseguenze dei cambiamenti climatici

² Stern Review on the Economics of Climate Change, 2006

del cambiamento climatico, il Protocollo di Kyoto rappresenta il primo strumento negoziale per la riduzione concordata a livello internazionale delle emissioni dei gas a effetto serra. Il Protocollo assegna all'Italia un obiettivo di riduzione delle emissioni di gas serra, da realizzarsi entro il 2012, del 6,5% rispetto ai livelli del 1990. In realtà nel nostro Paese le emissioni, invece di diminuire, sono aumentate del 13%, portando a circa il 20% la riduzione da realizzarsi da oggi al 2012. La complessità dei problemi energetico-ambientali, qui brevemente tracciati, richiede un approccio soprannazionale e impone la necessità di sviluppare a livello internazionale (ed europeo in particolare) azioni congiunte in grado di armonizzare le politiche e gli strumenti d'intervento, assicurando una massa critica adeguata per affrontare su base cooperativa le attività sul piano della ricerca e dell'innovazione tecnologica.

1.2 Il ruolo delle fonti rinnovabili di energia

La domanda energetica in forte crescita non potrà essere soddisfatta, a livello globale, dalle tecnologie tradizionali, senza aumentare fortemente la pressione sull'ambiente, sulla salute dell'uomo e sulla sicurezza dell'approvvigionamento. Sarà invece necessario che acquistino un ruolo dominante, tecnologie in grado di soddisfare la domanda riducendo al minimo tali pressioni, come ad esempio, le tecnologie che sfruttano fonti rinnovabili per produrre energia. In particolare si definiscono *energie rinnovabili*, quelle forme di energia generate da fonti che, per loro caratteristica intrinseca, si rigenerano o non sono "esauribili" nella scala dei tempi "umani" e, per estensione, il cui utilizzo non pregiudica le risorse naturali per le generazioni future. Spesso sono usate come sinonimi di "energie rinnovabili" anche le locuzioni, "energie sostenibili" e "fonti alternative di energia". Esistono tuttavia delle sottili differenze:

✓ *Energia sostenibile* è una modalità di produzione ed uso dell'energia che permette uno sviluppo sostenibile: ricomprende dunque anche l'aspetto dell'efficienza degli usi energetici.

✓ *Fonti alternative di energia* sono invece tutte quelle fonti diverse dagli idrocarburi, cioè non fossili.

Alla luce di ciò, non esiste una definizione univoca dell'insieme delle fonti rinnovabili; secondo la normativa di riferimento italiana, sono considerate "rinnovabili":

“...il sole, il vento, le risorse idriche, le risorse geotermiche, le maree, il moto ondoso e la trasformazione in energia elettrica dei prodotti vegetali e dei rifiuti organici e inorganici.”

L'utilizzo delle energie rinnovabili rappresenta un'esigenza sia per i Paesi industrializzati sia per quelli in via di sviluppo. I primi necessitano, nel breve periodo, di un uso più sostenibile delle risorse, di una riduzione delle emissioni di gas serra e dell'inquinamento atmosferico, di una diversificazione del mercato energetico e di una sicurezza di approvvigionamento energetico. Per i Paesi in via di sviluppo, invece, le energie rinnovabili rappresentano una concreta opportunità di sviluppo sostenibile e di accesso all'energia in aree remote. Diversi studi pubblicati dalla compagnia petrolifera “*Shell Oil*” analizzano scenari in cui, entro il 2050, circa 1/3-1/2 dell'intera domanda mondiale di energia potrebbe essere soddisfatta da risorse di energia rinnovabile. Questo è conforme a quanto affermato dal Consiglio europeo per le energie rinnovabili in un rapporto del 2004, in cui si prevede che il 50% della principale energia mondiale potrebbe essere rinnovabile entro il 2040. L'Unione Europea (UE), infatti, mira ad aumentare l'uso delle risorse rinnovabili per limitare la dipendenza dalle fonti fossili convenzionali e allo stesso tempo far fronte ai pressanti problemi di carattere ambientale che sono generati dal loro utilizzo. A conferma di ciò nella Direttiva 2001/77/CE “*Promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili*”, viene posto come traguardo il soddisfacimento, entro il 2010, di una quota pari al 12% del consumo interno lordo di energia ed al 22% di quello dell'energia elettrica, attraverso l'utilizzo di fonti rinnovabili. Per ottenere questi risultati, nella direttiva sono indicati degli obiettivi differenziati per ogni singolo Stato membro e l'Italia si è prefissa di raggiungere, entro il 2010, una quota pari al 22% della produzione elettrica nazionale. Nonostante le misure adottate dall'Unione Europea già dal 1997, non sarà possibile raggiungere al 2012 l'obiettivo del 12% da rinnovabili sul totale delle fonti energetiche, soprattutto per l'assenza di un quadro strategico coerente ed efficace e di una visione stabile sul lungo termine. In seguito a questa situazione nasce la necessità di realizzare un nuovo quadro

legislativo di riferimento in materia di promozione e di utilizzo delle rinnovabili nell'Unione Europea, al fine di garantire al settore privato quella stabilità a lungo termine che è condizione necessaria per definire piani d'investimento in questo settore. Per conseguire entro il 2020 l'obiettivo del 20% di rinnovabili sul consumo totale di energia, la Commissione ha previsto un costo aggiuntivo medio annuo tra il 2005 e il 2020 compreso, in funzione essenzialmente del prezzo del petrolio, tra 10 e 18 miliardi di euro. Tale costo verrebbe però compensato dalle rilevanti riduzioni di fonti fossili importate e di emissioni di gas serra realizzate grazie alla sostituzione accelerata dei combustibili fossili con le fonti rinnovabili. Questi investimenti consentirebbero, d'altra parte, di creare numerosi posti di lavoro e di sviluppare nuove imprese tecnologiche europee. Per raggiungere tali obiettivi, il Consiglio europeo ha invitato espressamente la Commissione ad elaborare entro il 2007 una proposta di direttiva che contenga disposizioni in merito agli obiettivi nazionali degli Stati membri, agli obiettivi settoriali per fonte e alle misure per il loro conseguimento nonché disposizioni per garantire la produzione e l'uso sostenibile di biomassa evitando i conflitti tra i diversi usi.³

L'efficienza energetica e l'aumento delle quote delle rinnovabili realizzate con le tecnologie disponibili nel prossimo futuro, acquisiranno sempre più un ruolo determinante per rispondere alla sfida. Ciò vale ancor più se si concentra l'attenzione sul sistema energetico nazionale, che si caratterizza per diverse peculiarità che hanno un impatto negativo sul sistema-paese.

³ Fonte: Enea, *Rapporto energia e ambiente 2006*

Capitolo 2

L'energia rinnovabile che viene dal mare

2.1 Il mare come grande riserva di energia

L'esaurimento delle riserve di combustibili fossili, unito ad un'attenzione sempre maggiore per la salvaguardia dell'ambiente, ha accresciuto, negli ultimi trent'anni, l'interesse verso nuove fonti di energia alternative, ecocompatibili e rinnovabili. Alle più note energie inesauribili, come il solare, l'eolico o l'idroelettrico, si comincia ad affiancare, oggi, un intero filone di tecnologie utilizzate per ricavare elettricità direttamente dal mare. Il settore dell'energia marina è uno dei settori maggiormente in corso di sviluppo e, dopo il solare e l'eolico, rappresenta la più recente sfida nel campo delle energie rinnovabili. I mari e gli oceani del pianeta coprono i 2/3 della superficie terrestre e pertanto costituiscono un'immensa riserva di energia, il cui sfruttamento può consentire di soddisfare una parte del fabbisogno energetico in varie regioni del mondo.

Il termine *Energia Marina* viene comunemente utilizzato in riferimento all'energia di marea o all'energia ondosa; ciò nonostante, è importante ricordare che molte altre tipologie di energia possono essere estratte dal mare. In particolare l'energia marina si manifesta nelle seguenti forme:

- energia dai gradienti salini;
- energia dai gradienti termici;
- energia da biomassa marina;
- energia dalle maree;
- energia dalle correnti marine e dalle correnti di marea;
- energia da onde.

2.2 Le diverse forme di energia estraibili dal mare

2.2.1 Energia a gradiente salino

L'energia a gradiente salino, detta anche energia osmotica, è l'energia legata alla differenza di concentrazione salina fra l'acqua di mare e l'acqua dolce. L'energia osmotica, che si libera in elevate quantità alla foce di un fiume, dove l'acqua dolce si mescola con la salata, può essere convertita in energia utile mediante l'impiego di una membrana semipermeabile, che separa l'acqua dolce da quella salata: il liquido a bassa salinità passa attraverso la membrana nella soluzione a salinità maggiore generando una sollevazione del livello dell'acqua salata e creando quindi un salto sfruttabile con tecnologie idroelettriche tradizionali. La quantità di energia ottenibile con questo procedimento è significativa. Nei Paesi Bassi, ad esempio, dove più di 3.300 m^3 al secondo di acqua dolce sfociano in mare, l'energia potenziale è di 3.300 MW , in base ad una produzione di 1 MW/m^3 d'acqua dolce. Dal 2005 è attivo un impianto sperimentale da 50 kilowatt, situato in un sito-test costiero in Harlingen, Paesi Bassi.

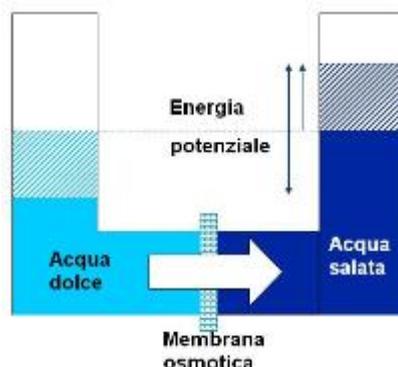


Figura 2.1: Descrizione del processo osmotico, sfruttato la fine di produrre energia.

2.2.2 Energia dai gradienti termici

L'energia termica marina è l'energia legata alle differenze di temperatura che si riscontrano tra i diversi strati del mare. L'energia solare, infatti, riscalda la superficie del mare e crea una differenza di temperatura tra le acque superficiali, che possono raggiungere i 25°-28°, e quelle situate, per esempio, ad una profondità di 600 m, che non superano i 6°-7°. La prima centrale per la conversione dell'energia termica degli oceani (Otec) è nata nel 1996 al largo delle isole Hawaii e presenta il seguente principio di funzionamento: le acque superficiali, più calde, consentono di far evaporare sostanze a basso punto di ebollizione, come ammoniaca e fluoro; i vapori ad alta pressione, mettono in moto una turbina ed un generatore di elettricità, passano in un condensatore e tornano allo stato liquido raffreddati dall'acqua aspirata dal fondo. La potenza ricavabile, attualmente, da tale impianto, è di 50 KW, ma si prevede di raggiungere una produzione pari a 2 MW, con un necessario aumento dei costi.

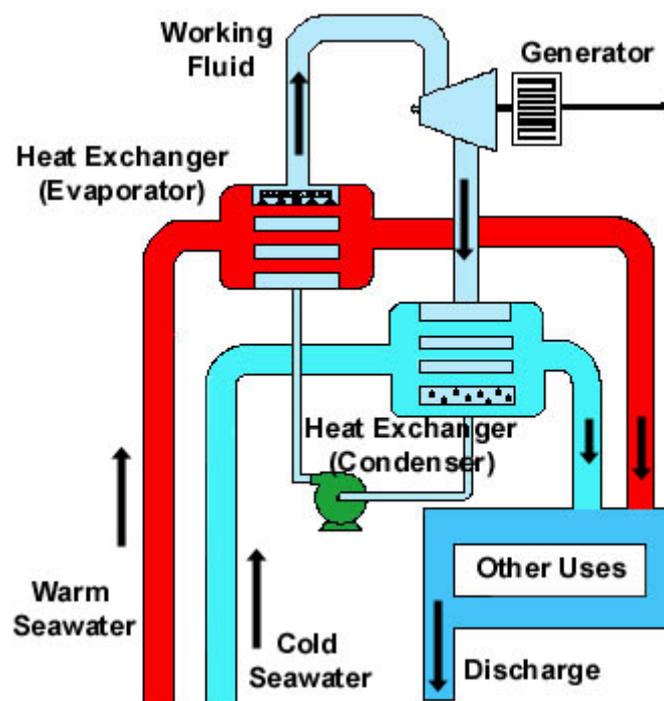


Figura 2.2: Principio di funzionamento dell'OTEC.

L'OTEC è una tecnologia che si presenta vantaggiosa solo nei mari tropicali, dove la differenza di temperatura tra le acque di superficie e quelle profonde, è di circa 20°, differenza sufficiente a garantire la produzione di una quantità di energia economicamente

sfruttabile. La Figura 2.3 mostra i gradienti di temperatura oceanica esistenti nel mondo: le zone dal giallo al rosso sono le zone idonee per lo sfruttamento del gradiente termico al fine di produrre energia elettrica.

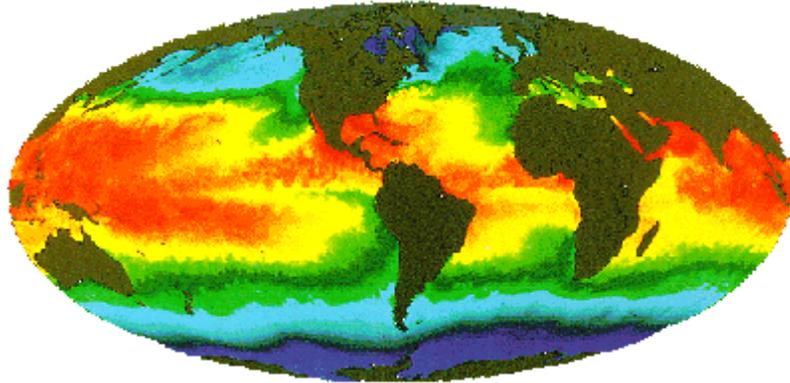


Figura 2.3: Mappa dei gradienti termici.

2.2.4 Energia da biomassa marina

Con il termine biomassa viene indicata la materia organica prevalentemente vegetale, terrestre e marina (spontanea o coltivata dall'uomo), prodotta per effetto del processo di fotosintesi clorofilliana con l'apporto dell'energia del sole, dell'acqua e di svariate sostanze nutritive.

L'energia contenuta nelle biomasse può essere utilizzata direttamente per la produzione di energia termica nel processo di combustione (uso tradizionale e dominante), per la produzione di energia elettrica, combinata all'energia termica, oppure concentrata in una varietà di combustibili solidi, liquidi o gassosi, tali da rendere più facile il trasporto e l'utilizzazione finale.

Le biomasse marine rappresentano una potenziale fonte di energia rinnovabile, con efficienza fotosintetica nettamente superiore alla biomassa terrestre. Le alghe, in particolare, non solo hanno un rendimento maggiore degli altri tipi di coltivazioni e permettono quindi di generare molti più litri di biocombustibile, ma durante la loro crescita svolgono anche l'importantissima funzione di assorbire anidride carbonica, che utilizzano per la fotosintesi. Si sta pertanto valutando la possibilità di coltivare in aree marine designate e controllate vegetazione di veloce crescita con ottimo ciclo di

maturazione al fine di produrre significative quantità di biomassa da raccogliere ed utilizzare in impianti ad energia convenzionale.

2.2.5 Energia dalle maree

La marea è il ritmico innalzamento e abbassamento del livello del mare provocato dall'azione gravitazionale della Luna e del Sole. Le maree, solitamente, presentano un'ampiezza (dislivello tra l'alta marea e la bassa marea) inferiore ad 1 metro. In alcune zone, per la particolare configurazione del sito, i dislivelli possono essere particolarmente elevati, tali da prestarsi ad essere sfruttati per la produzione di energia elettrica mediante centrali di marea. In fase di alta marea, quando l'onda di marea è sufficientemente alta, l'acqua fluisce in un vasto bacino passando attraverso una serie di tunnel, nei quali aziona delle turbine collegate a dei generatori. Durante la bassa marea, al contrario, l'acqua del bacino defluisce verso il mare aperto e nuovamente mette in rotazione le turbine poste all'interno dei tunnel. Le turbine impiegate negli impianti di mare sono turbine di tipo reversibile, capaci cioè di azionarsi per entrambe le direzioni del flusso. Una delle centrali più significative è in funzione da circa 30 anni nella Francia settentrionale, alla foce del fiume Rance, sulla Manica; la differenza tra il livello minimo e il livello massimo dell'acqua è di 12-13 metri e la potenza è di 240 MW. Ad oggi sono stati individuati, a livello globale, 21 siti, dove le caratteristiche delle maree sono adatte all'installazione di questo tipo di centrali mareomotrici. Nella sola Inghilterra il potenziale stimato, considerando gli impianti realizzabili, è di 6.000 MW.

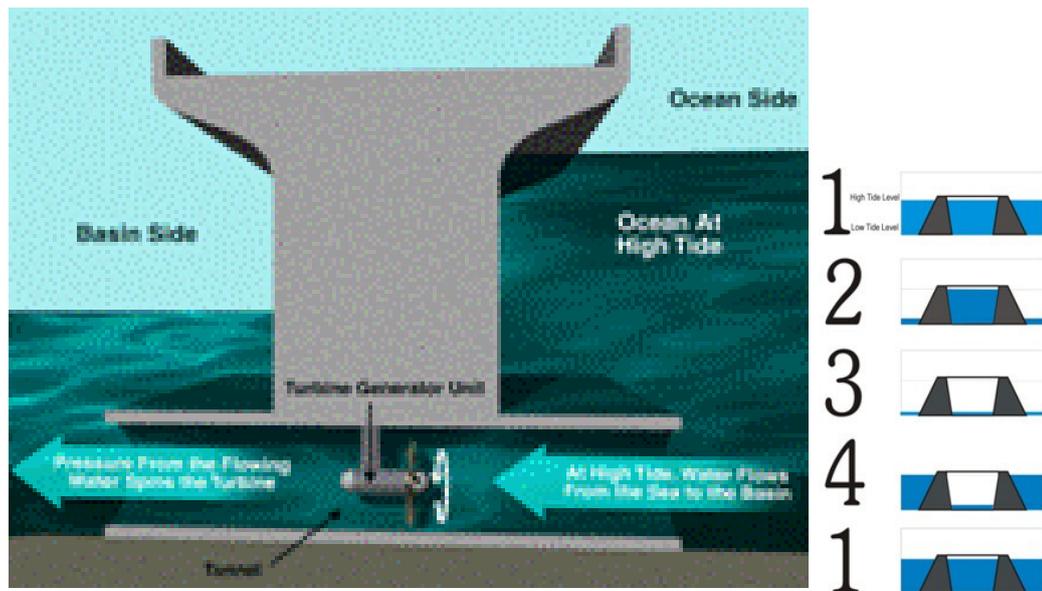


Figura 2.4: Schema di un impianto di marea – ciclo impianto di marea.

2.2.6 Energia dalle correnti marine e di marea

Con il termine corrente marina viene indicato un qualsiasi movimento di massa d'acqua, persistente nel tempo, indotto da molteplici fattori. Si tratta di masse d'acqua di densità diversa, che scorrono con una certa velocità, seguendo una direzione quasi costante e senza mescolarsi con le acque circostanti, dalle quali si distinguono sia per la temperatura sia per la salinità, ed a volte anche per il colore e le concentrazioni di materiali sospesi.

Le correnti di marea, nello specifico, sono particolari correnti marine che hanno origine dall'escursione mareale; l'energia delle correnti di marea rappresenta una delle fonti più interessanti ed inesplorate tra le fonti di energie rinnovabili.

Le correnti marine sono dotate di energia cinetica e possono pertanto essere sfruttate con lo stesso principio utilizzato per l'energia eolica: con generatori ad asse orizzontale, nel caso di correnti marine costanti, come quelle presenti nel Mediterraneo; con generatori ad asse verticale, nel caso di correnti di marea, cambiando queste direzione di 180° più volte nell'arco di una giornata.

Nella sola Europa la disponibilità di questo tipo di energia è pari a circa 75 GW. I costi degli impianti sperimentali sono già buoni (0.07€/kWh) e si calcola di raggiungere costi ancora più competitivi per impianti multipli.



Figura 2.5: Turbine che sfruttano le correnti marine

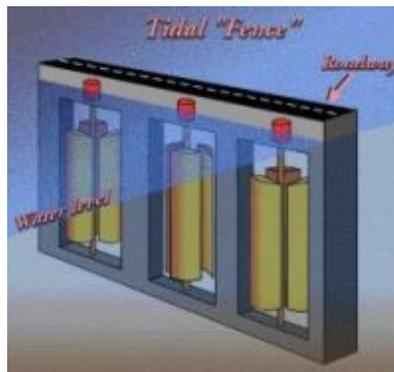


Figura 3.6: Turbine che sfruttano le correnti di marea

2.2.7 Energia da onda

L'energia ondosa, insieme all'energia di marea, costituisce oggi la forma di energia marina maggiormente studiata e sfruttata. Questo tipo di energia sarà oggetto di una trattazione più diffusa e ampia nel capitolo 3 (*"Estrazione di energia dalle onde"*), poiché la mia tesi ha come oggetto l'analisi di un dispositivo capace di estrarre energia utile dal moto ondoso.

Capitolo 3

Estrazione di energia dalle onde

3.1 L'energia ondosa

L'energia ondosa è l'energia associata al moto delle onde, ovvero al moto dell'acqua in prossimità della superficie marina. L'azione del Sole sull'atmosfera determina la formazione del vento, che quindi soffia sul mare e genera le onde. Queste rappresentano pertanto una riserva di energia solare, poichè nascono dal trasferimento di energia dal sole, al vento e quindi all'acqua. Una volta generate, le onde viaggiano per migliaia di chilometri presentando piccole perdite di energia. Nell'avvicinarsi alla linea di costa la profondità del mare diminuisce e le onde assistono ad una forte diminuzione di energia per effetto dell'interazione col fondale.

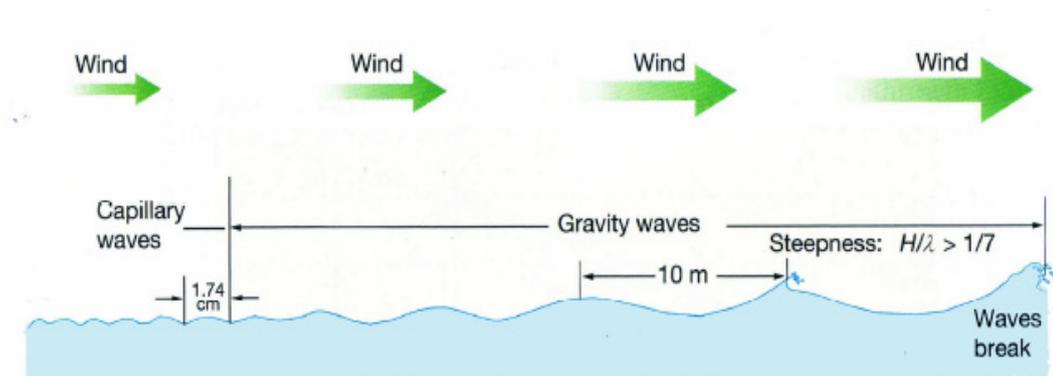


Figura 3.1: Schema descrittivo della generazione delle onde.

3.2 Distribuzione della potenza ondosa

L'energia delle onde si calcola in termini di potenza per ogni metro del fronte d'onda ed è misurata, generalmente, in kW/m. Come la maggior parte delle fonti di energia rinnovabile, anche quella ondosa è distribuita in maniera disomogenea a livello globale. L'attività ondosa, in particolare, risulta intensa nelle zone comprese tra i 30° e i 60° di latitudine, su entrambi gli emisferi, per la presenza di venti che soffiano prevalentemente da Ovest. La costa occidentale dell'Europa, situata nella parte terminale del lungo fetch dell'Atlantico, è caratterizzata da un clima meteomarinico altamente energetico; livelli di potenza più elevata sono riscontrati solo nelle parti meridionali del sud dell'America e agli Antipodi.

Recenti studi attribuiscono all'area del Nord-Est Atlantico, che comprende la costa europea che si affaccia sull'Atlantico, una disponibilità di potenza ondosa di circa 290 GW. I livelli di potenza ondosa su scala annuale variano dai circa 25 kW/m, nella zona più a sud della costa atlantica, ai 75 kW/m, in corrispondenza dell'Irlanda e della Scozia. Nel Mare del Nord la risorsa energetica subisce forti oscillazioni, variando dai 21 kW/m, nell'area più esposta (a nord), a potenze dimezzate nell'area più riparata (a sud).

Nel bacino del Mediterraneo, invece, il livello energetico annuale, lungo le coste dei Paesi europei, varia tra i 4 e gli 11 kW/m. L'intera potenza annuale lungo le coste europee del Mediterraneo è dell'ordine di 30 GW, che sommandosi a quella delle coste europee che si affacciano sull'Atlantico, comporta un'energia ondosa totale a livello europeo pari a 320 GW.

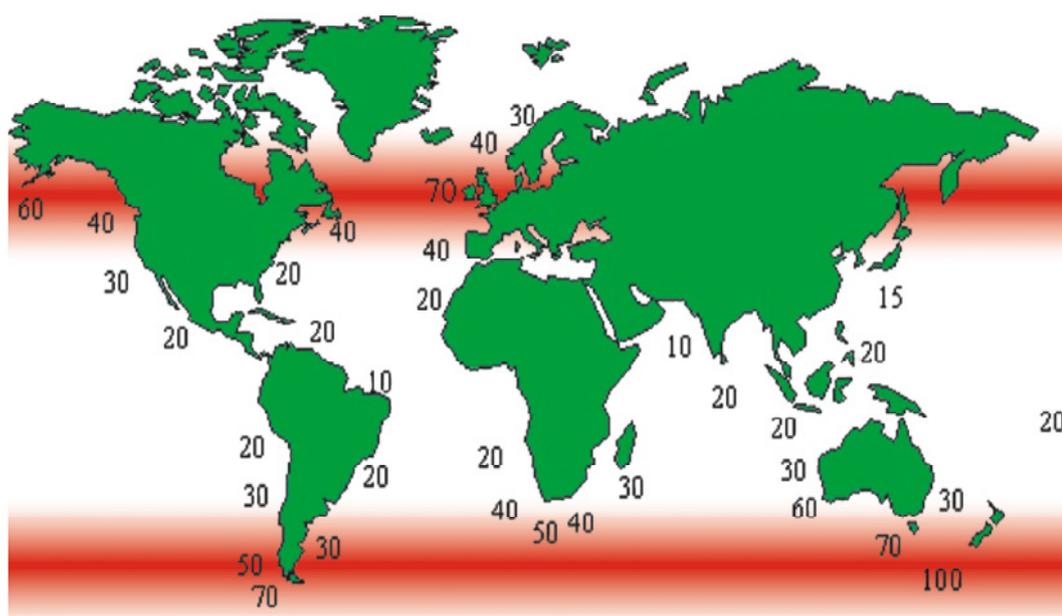


Figura 3.2: Distribuzione della potenza energetica a livello globale (valori espressi in kW/m).

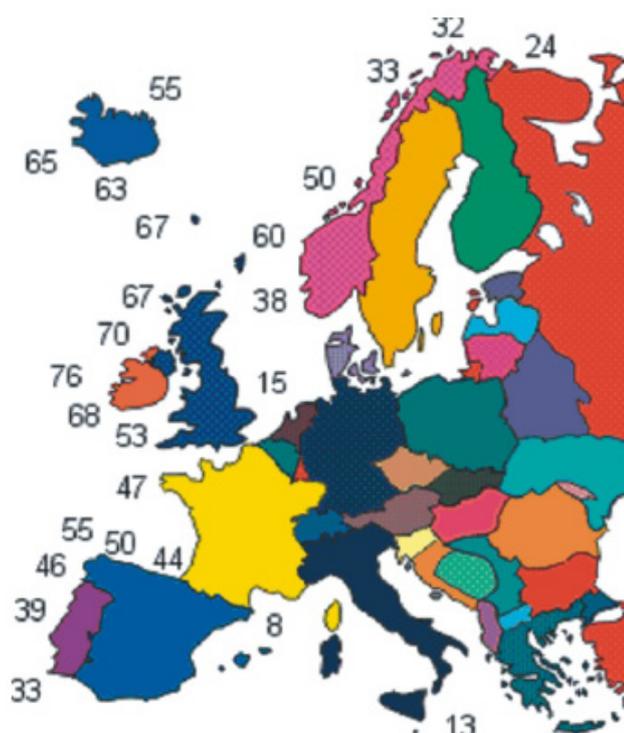


Figura 3.3: Distribuzione della potenza energetica a livello europeo (valori espressi in kW/m).

3.3 Tecnologie per la generazione di energia dalle onde

I dispositivi in grado di generare elettricità, sfruttando l'energia del moto ondoso, sono denominati WECs (Wave Energy Converters). Negli anni sono state proposte una grande varietà di tecniche, finalizzate a convertire l'energia contenuta nelle onde in energia utilizzabile. Queste tecniche sono classificabili secondo tre metodi principali:

I. Metodo di classificazione basato sull'intallazione in mare dei WECs

- **dispositivi galleggianti;**
- **dispositivi fissati al fondo.**

II. Metodo di classificazione basato sulla localizzazione in mare dei WECs

- **shoreline** : WEC installato su una scogliera o affioramento roccioso;
- **nearshore** : WEC installato nella fascia di transizione tra la riva e la zona di acque profonde; in questa fascia aumenta l'ampiezza dell'onda e le onde iniziano a risentire della presenza del fondale;
- **offshore** : WEC installato nella zona di acque profonde (>40 m), dove le onde si propagano quasi senza dissipare energia

III. Metodo di classificazione basato sul principio di funzionamento dei WECs

Non esiste una classificazione dei WECs, in termini di principio di funzionamento, univoca. 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. Le categorie individuate sono:

- **dispositivi a trascinamento;**
- **dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC, (Oscillating Water Columns);**
- **zattere articolate;**
- **boe e galleggianti;**
- **dispositivi a galleggiamento controllato.**

3.3.1 Dispositivi a tracimazione (Overtopping)

I dispositivi Overtopping sono dispositivi che sfruttano il fenomeno della tracimazione ondosa per produrre energia. Tali sistemi prevedono dei bacini nei quali l'acqua si accumula per tracimazione delle onde incidenti. Il volume d'acqua immagazzinato, sopraelevato rispetto al mare circostante, viene scaricato nuovamente in mare attraverso una turbina (di solito di tipo Kaplan), che sfrutta la trasformazione dell'energia potenziale gravitazionale in energia cinetica. Un primo esempio significativo dell'impiego di questo tipo di tecnologia è costituito dal dispositivo denominato Tapchan (Tapered Channel), costituito da un bacino installato sulla terraferma e pertanto progettato per uso costiero. Solo successivamente tale tecnologia è stata adattata all'uso in mare aperto, mediante l'impiego di bacini e rampe galleggianti.

3.3.1.1 Wave Dragon

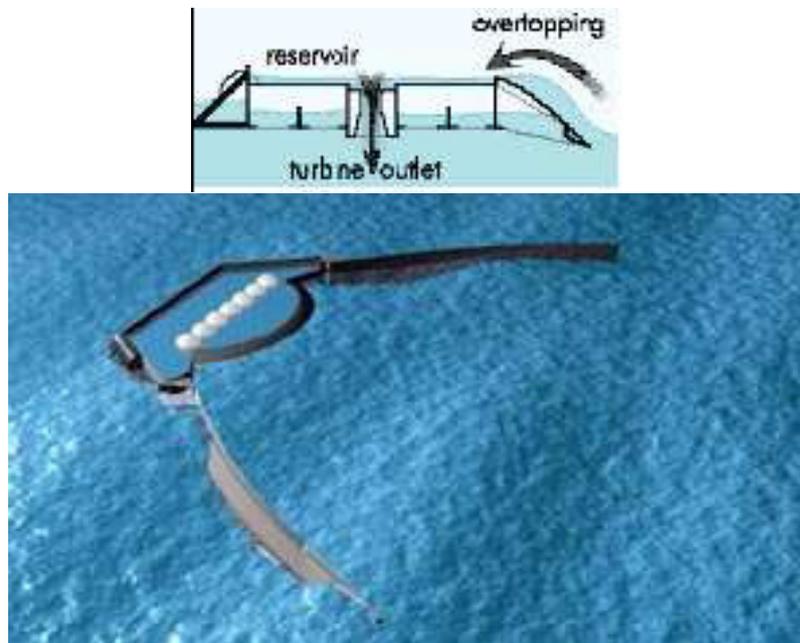


Figura 3.4: Wave Dargon

Classificazione:

- off-shore (in acque profonde almeno 40 m);
- galleggiante;

- a tracimazione;

Principio di funzionamento:

Il Wave Dragon (attualmente esiste un prototipo da 237 tonnellate installato nella Danimarca settentrionale) recupera l'energia generata dalle onde che lo sommergono e la convoglia in un serbatoio sopraelevato tramite una rampa. L'acqua defluisce poi attraverso un gruppo di turbine che producono elettricità.

Wave Dragon prevede una larga struttura galleggiante composta principalmente da un bacino di riserva e da due bracci riflettori. I due bracci hanno la funzione di intercettare e convogliare le onde incidenti verso l'area centrale, dove salgono quindi su una rampa specificamente modellata e ricadono nel bacino di riserva sopraelevato. La bassa energia potenziale dell'acqua viene quindi convertita in energia cinetica mediante turbine Kaplan, che azionano in maniera permanente generatori magnetici, generando perciò elettricità sulla base dello stesso principio di funzionamento dei convenzionali impianti idroelettrici a terra. E' una delle strutture più pesanti (se non la più pesante) impiegate per produrre elettricità dalle onde oceaniche.

Fattibilità:

Impatto ambientale: basso. Necessiterà di un largo sistema di ancoraggio a causa dell'entità delle deformazioni, ma necessiterà di un ancoraggio molto più piccolo di un numero di boe simili che generano in combinazione lo stesso quantitativo di energia.

Manutenzione: medio- bassa. L'entità delle deformazioni renderanno l'apparecchio stabile nel corso di tempeste, perciò non dovrebbero esserci problemi. Per effetto delle sue dimensioni il Wave Dragon non dovrebbe essere sottoposto ad una ampia manutenzione.

Fabbricabilità: medio-scarso. Si tratta di una struttura larga che presenta grosse difficoltà di trasporto ed installazione. Le turbine inoltre devono essere progettate in maniera speciale per un uso a pressioni relativamente basse.

Stadio di sviluppo: E' prevista l'installazione di una apparecchiatura da 7MW lungo la costa del Galles.

Potenza massima: 10 MW

Peso: 22 000 - 33 000 t.

Capacità: 5 000 m³ - 8 000 m³.

Costi di realizzazione: 13.5 mill. Euro.

Costi energetici: 0.11 euro/kWh

3.3.1.2 Seawave Slot-Cone Generator



Figura 3.5: SSG

Classificazione:

- shoreline;
- fissato al fondo;
- a tracimazione;

Principio di funzionamento:

Il «Seawave Slot-cone generator» (SSG) è un convertitore costituito da tre serbatoi posti uno sopra l'altro. L'acqua, per tracimazione, viene raccolta nei serbatoi e fatta scorrere attraverso una turbina multistadio che alimenta un sistema di generazione elettrica, e permette quindi di produrre elettricità. La struttura a tre livelli garantisce un alto livello di efficienza e la generazione continua di energia, infatti, consente di raccogliere sia onde di elevata dimensione, che creano la maggior parte dell'energia, sia onde piccole, che permettono la produzione continua dell'energia. Gli ideatori del sistema sostengono che esso sia efficiente e che possa essere installato anche su strutture offshore, come piattaforme petrolifere fuori uso.

Fattibilità:

Impatto ambientale: Alto, se è costruito a riva, basso, se è costruito a largo; a riva, infatti, occuperà completamente la spiaggia sulla quale verrà installato.

Manutenzione: Bassa. Utilizzerà tecnologie idrauliche ben sperimentate e tutte le componenti saranno facilmente accessibili.

Fabbricabilità: medio-scarso. Richiederà un'ampia struttura. Il sistema è inoltre limitato a siti con ripidi che si affacciano su acque profonde.

Stadio di sviluppo: Idea progettuale

3.3.2 Dispositivi a colonna d'acqua oscillante (OWC)

I dispositivi OWC rappresentano una tipologia di convertitori di energia ondosa tra i più diffusi. Una camera parzialmente sommersa (collettore) raccoglie le onde in entrata, il cui movimento comprime l'aria al di sopra della colonna d'acqua; l'aria compressa, quindi, aziona una turbina, collegata a sua volta ad un generatore elettrico. Quando l'onda si ritira, si crea una depressione nella colonna che risucchia indietro l'aria verso il mare. Questo movimento all'indietro può essere sfruttato per produrre elettricità se la turbina è appositamente studiata per muoversi sempre in una sola direzione, indipendentemente dall'alternanza del flusso di aria. A partire dalla metà degli anni Ottanta sono stati posti in funzione prototipi di unità OWC in diversi siti nel mondo e i progettisti hanno sviluppato per questa tecnologia una esperienza maggiore che per qualsiasi altra. Un'ampia descrizione di questa tipologia di dispositivi verrà fornita nel capitolo 4. Qui di seguito sono stati forniti solo due esempi di OWCs, uno onshore ed uno offshore.

3.3.2.1. Limpet



Figura 3.6:Limpet

Classificazione:

- shoreline (preferibilmente profondità d'acqua 15 m);
- A colonna d'acqua oscillante.

Principio di funzionamento:

Il Limpet 500 (Land Installed Marine Pneumatic Energy Transformer-500kW) è un OWC shoreline situato sull'isola di Islay lungo la costa ovest della Scozia.

Tale dispositivo è costituito da un collettore in calcestruzzo, contenente 3 camere di cattura (6m x 6m), e da un sistema di generazione elettrica installato immediatamente dietro al muro posteriore del collettore. All'interno delle 3 camere le onde comprimono l'aria, il cui flusso eccita le turbine. Le 3 camere sono inclinate di 40° rispetto all'orizzontale, poiché alcuni studi hanno mostrato come la colonna inclinata faciliti l'ingresso e l'uscita dell'acqua e comporti pertanto meno turbolenze e minori perdite di energia.

Fattibilità:

Impatto ambientale: alto.

Il sistema occupa la spiaggia totalmente, quindi il suo utilizzo è probabilmente limitato ai frangiflutti e altri siti speciali. Però il sistema il sistema comporta piccoli impatti ambientali se posizionato su frangiflutti.

Manutenzione: Bassa.

Tutte le componenti essenziali verranno collocate fuori dall'acqua ed inoltre l'apparecchio risulta accessibile dalla spiaggia.

Fabbricabilità: Media.

Il sistema richiede una struttura solida che aumenterà i costi di installazione, ma l'installazione può essere semplificata se il sistema è progettato come parte integrale di un frangiflutto.

Stadio di sviluppo: Produzione

Potenza prodotta: 500 kW

3.3.2.2 Sperboy

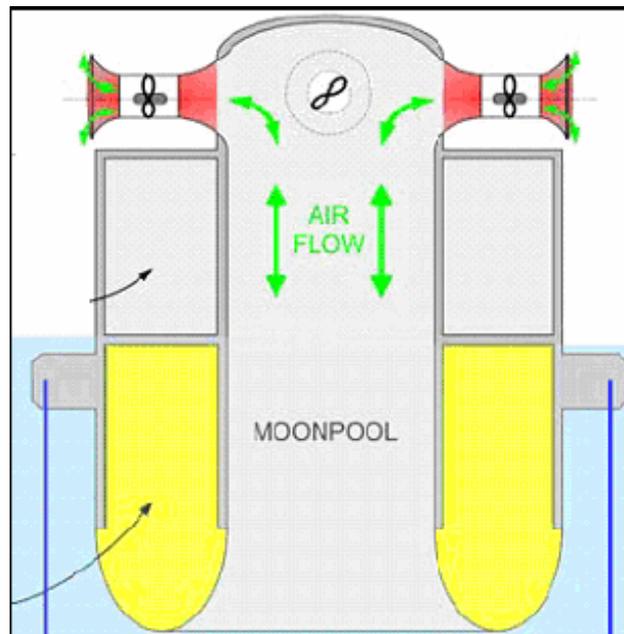


Figura 3.7: Sperboy

Classificazione:

- offshore (13-19 Km dalla costa);
- galleggiante;
- OWC.

Principio di funzionamento

Sperboy prevede una struttura galleggiante con una colonna chiusa e sommersa. Sopra l'OWC, sulla cima della boa, è alloggiato tutto l'impianto, ovvero turbine, generatori e l'insieme di attrezzature associate. Sperboy utilizza materiale galleggiante in modo da permettere il suo galleggiamento, e prevede numerosi cavi che lo mantengano ad un'altezza costante. All'interno dello strumento è presente un coulomb d'aria che oscilla al passaggio dell'onda. L'energia viene estratta dall'oscillazione dell'aria tramite una turbina che a sua volta trasferisce energia al generatore.

Fattibilità:

Impatto ambientale: basso.

Il sistema non interferisce con il fondale o con la spiaggia

Manutenzione: Bassa.

Tutte le componenti critiche verranno collocate fuori dall'acqua perciò bassa corrosione.

Fabbricabilità: buona.

Il sistema può essere prefabbricato e non necessita di una struttura sul fondale.

Stadio di sviluppo: Test avanzati e ottimizzazione

3.3.3 Zattere articolate (heave surge wave devices)

Le zattere articolate sono dispositivi costituiti da segmenti snodati e generano energia sfruttando il movimento relativo di tali segmenti; tra un segmento e l'altro, sono posti, accoppiati a dei generatori, dei pistoni azionati dal moto oscillatorio. Le zattere vengono posizionate perpendicolarmente al fronte d'onda e poiché le onde risultano attenuate, una volta superato il dispositivo, vengono denominate "attenuatori".

3.3.3.1 Pelamis

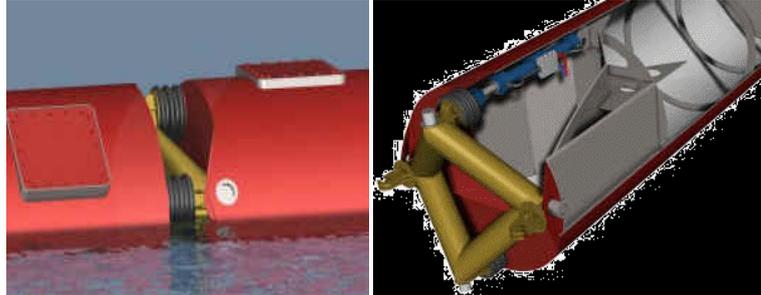


Figura 3.8: Connessioni tra due segmenti del Pelamis



Figura 3.9: Pelamis

Classificazione:

- offshore (5-10 Km dalla costa);
- galleggiante;
- zattera articolata;
- sopra il livello del mare.

Principio di funzionamento:

Il dispositivo Pelamis è un sistema semisommerso, costituito da una serie di elementi cilindrici in acciaio connessi tra loro da giunti incernierati. In corrispondenza dei

giunti, al passaggio delle onde, si verificano movimenti di curvatura. Cilindri idraulici integrati nelle giunture tra gli elementi assorbono tali movimenti e li trasmettono, mediante un sistema idraulico, a sei generatori di elettricità. La singola struttura, generalmente, è composta da 5 elementi congiunti, ha un diametro di 3,5 m, è lunga 150 metri, ed è in grado di produrre la potenza di 750 kW. Molti moduli possono essere collegati in parallelo e l'elettricità è immessa nella rete di distribuzione mediante un unico sistema via cavo.

Fattibilità:

Impatto ambientale: Basso. L'unità stessa avrà un piccolo impatto ambientale così come l'ancora, che è molto piccola. Il sistema idraulico inoltre usa fluido biodegradabile.

Manutenzione: Basso. Questo sistema utilizza tecnologia già testata e tutte le componenti critiche sono facilmente accessibili. Se necessario, lo strumento può essere trainato ad un porto nelle vicinanze col fine di servirlo.

Fabbricabilità: Buona. La struttura è in acciaio e può essere costruita in quasi tutti i cantieri navali usando attrezzature standard, e quindi trasportata nel sito previsto.

Stadio di sviluppo: E' stato installato in Portogallo (Agucadura) il primo parco mondiale dalla capacità di 2.25MW.

Potenza prodotta da un singolo dispositivo: 750 kW.

Peso: 750 t.

Dimensioni: lunghezza di 150m e diametro di 4.63m.

Costo per un singolo dispositivo: dai 2 ai 3 milioni di dollari (stima riferita al 2004).

3.3.4 Boe e galleggianti

Si è dimostrato, sia matematicamente 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. Esistono diverse tipologie di

boe, che si basano su svariati principi di funzionamento: si possono avere boe rigide che sfruttano la spinta idrostatica per azionare un meccanismo di estrazione di energia; si può trattare di un cilindro idraulico tra la boa galleggiante ed il fondale, o tra la boa e una piastra frenante; oppure esistono delle boe che contengono una colonna d'acqua e, si va a sfruttare il movimento relativo della boa rispetto alla superficie dell'acqua per agire sulla colonna d'acqua.

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 a esse senza trasmettere tali forze alle fondamenta o agli ormeggi.

3.3.4.1 DWP (Danish Wave Power device)

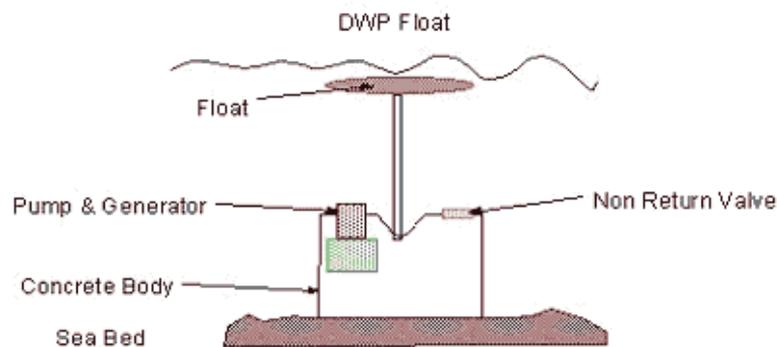


Figura 3.10: Principio di funzionamento del DWP

Classificazione:

- offshore
- galleggiante assorbitore lineare
- sotto il livello del mare

Principio di funzionamento

Il dispositivo DWP usa un galleggiante che attraverso il moto di andata e ritorno delle onde aziona il pistone della pompa, fissata ad un basamento sul fondale; in questo modo, la pompa aziona una turbina idraulica e un generatore che sono montati su di essa. Il flusso di acqua attraverso la turbina è mantenuta unidirezionale grazie a una valvola di non ritorno che impedisce all'acqua di essere risucchiata indietro. Il sistema è stato sviluppato nel 2000.

3.3.5 Dispositivi a galleggiamento controllato

Sono particolari tipi di boe; nello specifico, si tratta di boe flessibili riempite d'aria ed aperte alla base. La variazione dell'altezza dell'acqua all'esterno della boa provoca una variazione della spinta di galleggiamento che genera una forza sul sistema. L'aria è sotto pressione in modo che la boa galleggi in equilibrio ad una 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. Una limitazione imposta allo spostamento della boa mantiene la situazione sotto controllo. 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.

3.3.5.1 Archimedes Wave Swing

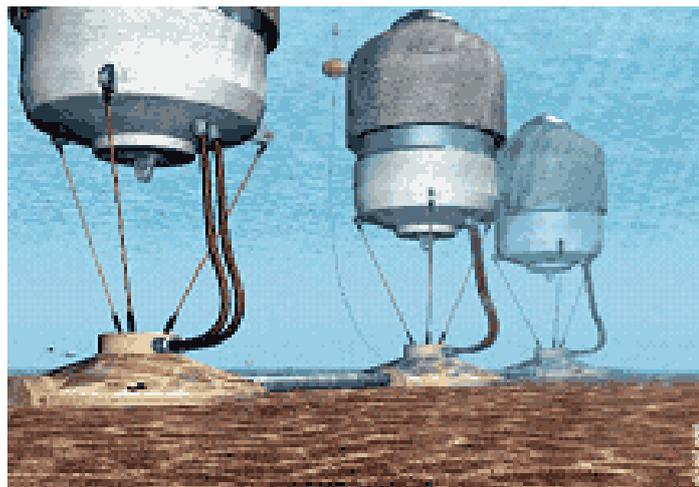
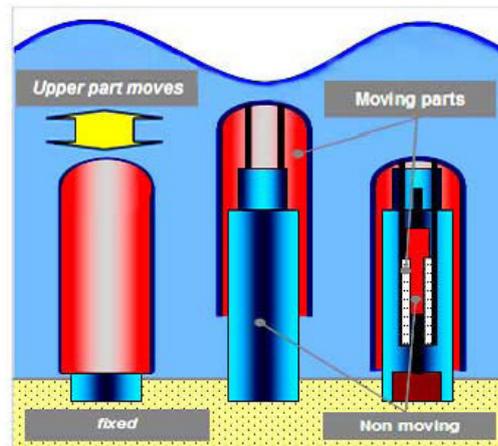


Figura 3.11: Archimedes Wave Swing

Classificazione

- Offshore;
- Fissato al fondale;
- Sommerso (> 6 m sotto la superficie del mare);
- Point absorber.

Principio di funzionamento

Il dispositivo è ancorato sul fondo ma in grado di galleggiare grazie ad una camera cilindrica, di diametro pari a 9.5 m, riempita d'aria; quest'ultima rappresenta anche l'elemento oscillante che raccoglie il moto su-giù delle onde: attraverso fasi di compressione e decompressione, l'aria determina una variazione nel galleggiamento rispetto al basamento fisso sul fondo, questo movimento è trasmesso ad un generatore elettrico.

Fattibilità

Impatto ambientale: Medio

Manutenzione: Media

Fabbricabilità: Media

Potenza generata: >1.2 MW.

Costi stimati: 4-6 milioni di \$.

Capitolo 4

OWCs (Oscillating water columns)

4.1. Introduzione

I dispositivi per la conversione dell'energia ondosa di tipologia OWC (Oscillating Water Column) sono denominati anche 'Convertitori a colonna d'acqua oscillante' e presentano un principio di funzionamento simile a quello delle turbine eoliche, poiché impiegano turbine ad aria per produrre energia.

Gli OWCs sono costituiti, in generale, da una camera parzialmente sommersa in comunicazione con l'ambiente marino circostante grazie ad un'apertura sul fondo, situata sotto il livello dell'acqua; l'onda viene catturata all'interno della struttura e si forma una colonna d'acqua che sostiene nello spazio sovrastante un certo volume di aria; questo volume viene periodicamente diminuito o aumentato in funzione dei movimenti di compressione/decompressione esercitati dalle onde che entrano ed escono dal dispositivo; l'effetto è quello di forzare l'aria nei due sensi attraverso le lamine di una turbina che nella maggior parte dei casi ruota in una sola direzione, indipendentemente dal verso del flusso (turbina Wells); il movimento meccanico della turbina aziona un motore da cui si genera una corrente elettrica.

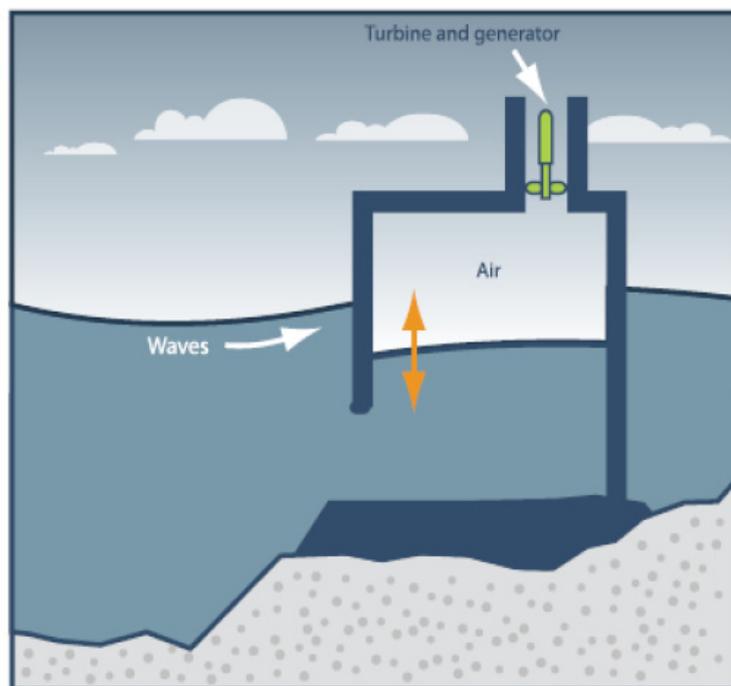


Figura 4.1: schema di un sistema OWC

Il primo esemplare di questo sistema è stato commercializzato nel 1960 dai giapponesi, montato su una boa di navigazione. Da allora i dispositivi si sono sviluppati e migliorati, mantenendo il principio della tecnologia ma variando alcune caratteristiche costruttive. In particolare, il sistema ha cominciato ad essere alloggiato oltre che lungo la costa anche vicino alla riva, o associato a strutture frangiflutti in modo da ridurre gli elevati costi di costruzione; e negli ultimi decenni si sono affermati anche sistemi OWC galleggianti, collocati in condizioni nearshore o offshore.

Il primo impianto commerciale OWC (potenza di 500 kW) è stato costruito a Toftesfallen in Norvegia nel 1985 ed è stato distrutto da una tempesta nel 1989.

In Scozia, sull'Isola Islay, è stato costruito nel 1991 un primo impianto da 75 kW, sostituito nel 2000 dal primo esempio di impianto commerciale OWC a fornire una quota di energia elettrica per la rete nazionale: il LIMPET.

Sempre nel 1991, nel Mare Cinese del Sud, è stato costruito un impianto da 20 kW; in seguito, un OWC da 100 kW è stato installato anche nella Provincia del Guangdong. Oggi, è in fase di avviamento anche un impianto da 400 kW, simile al LIMPET, nelle Isole Azzorre.

Due dispositivi OWC sono stati installati su frangiflutti al largo delle coste indiane e giapponesi: a Sakata (Giappone) un dispositivo da 60 kW è entrato in funzione nel

1989, mentre quello indiano è stato costruito nel 1991 e dotato di una turbogeneratore Wells da 150 kW.

Un OWC galleggiante che opera in condizioni offshore è stato sviluppato dalla compagnia giapponese JAMSTEC a partire dal 1987 ed installato a largo di Gokasho Bay off Mie Prefecture.

Nel corso degli ultimi 30 anni, quindi, sono stati realizzati e messi in funzione, con vari gradi di successo, numerosi OWCs a scala di prototipo.

Si distinguono due tipologie di apparecchiature OWC:

- **Onshore**

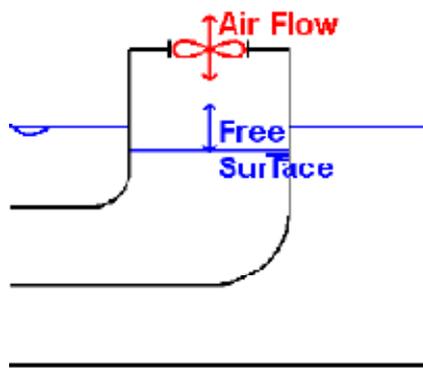


Figura 4.2: schema di OWC onshore

- **Offshore**

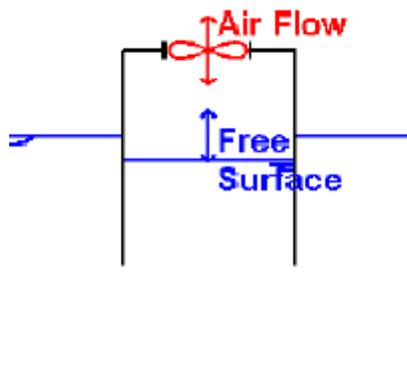


Figura 4.3: schema di un OWC offshore

4.2 On-shore OWCs

Sono dispositivi posizionati a riva. Si distinguono tre differenti tipologie di OWCs onshore:

- shoreline OWCs: dispositivi installati direttamente sulla terraferma, ovvero su spiagge o scogliere rocciose;
- nearshore OWCs: dispositivi installati vicino a riva;
- breakwater OWCs: dispositivi associati a frangiflutti o ad altri sistemi di difesa costiera.

4.2.1 Limpet



Figura 4.4: il Limpet

Il Limpet 500 (Land Installed Marine Pneumatic Energy Transformer-500kW) è un OWC shoreline situato sull'isola di Islay, lungo la costa ovest della Scozia. E' stato installato nel 2000 e attualmente almeno un terzo della popolazione di Islay (c.a. poco più di 1000 abitanti) sfrutta l'energia elettrica prodotta dal LIMPET.

Tale dispositivo è costituito da un collettore in calcestruzzo gettato in opera, contenente 3 camere di cattura (6m x 6m), e da un sistema di generazione elettrica installato immediatamente dietro al muro posteriore del collettore; la sala turbine racchiude due turbine Wells contro-rotanti, ciascuna delle quali aziona un generatore. All'interno delle 3 camere le onde comprimono l'aria, il cui flusso eccita le turbine attraverso un attenuatore acustico, installato dietro la sala turbine. Le 3 camere sono

inclinate di 40° rispetto all'orizzontale, poiché alcuni studi hanno mostrato come la colonna inclinata faciliti l'ingresso e l'uscita dell'acqua e comporti pertanto meno turbolenze e minori perdite di energia.

Le prestazioni di questo dispositivo sono comprese tra 15 e 25 kW/m, per un'intensità ondosa media, e la potenza nominale prodotta dai due generatori da 250 kW è pari a 500 kW.

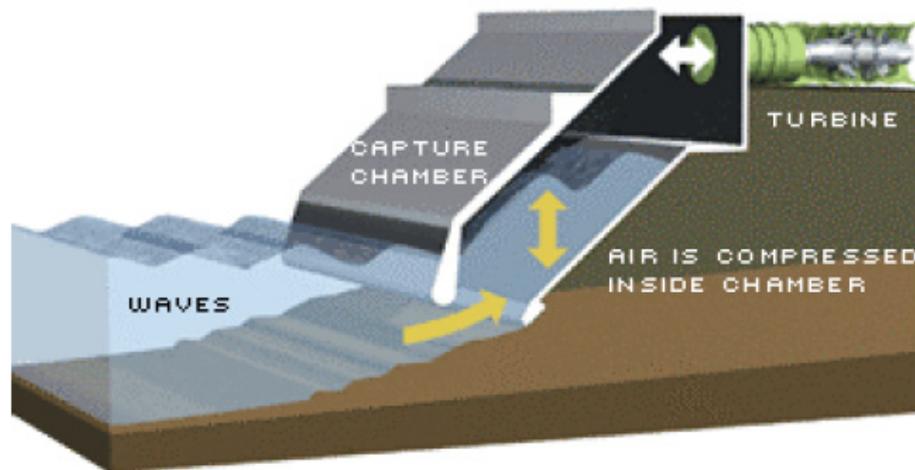


Figura 4.5: schema di funzionamento del Limpet

In Tabella 4.1 sono sintetizzate le principali caratteristiche di progetto.

Geometry		Wave / Sea Characteristics	
Total Width	21.0m	Depth at lip	6.0m
No. of Chambers + Width	3 x 6.0m	Design Wave Height, Hs max	4.4m
Chamber Angle	40° to horiz.	Design Wave Period	13.4s
Lip depth below MWL	2.3m	Return period	(n/a waves depth limited)
Total Height above MWL	12.8m	Max design wave pressure	600kN/m ²
Turbine		Generator	
Turbine Dia.	2.6m	Type	F3GTS 400 G8G
Nominal operating speed	1050rpm	Power at Generator Terminals	2 x 250kW
No. of Turbines	2	Duty Type	continuous inverter driven
Arrangement	In line, contra rotating	Rotor Type	Wound rotor (but used with rotors shorted)
Blade Form	NACA 12	Rated Voltage	400V
Number of blades	7	Rated Speed	1016rpm
Blade Chord	320mm	Max test speed	1500rpm
Hub to tip ratio	0.62	Inertia	Generator 11.5kgm ² Load 1300kgm ²

Tabella 4.1: caratteristiche di progetto di Limpet

In Tabell 4.2, invece, sono espresse le efficienze dello strumento.

Type of energy conversion	Structure / device	Estimated Efficiency%	Measured Efficiency%
Wave to pneumatic (measured at lip)	Oscillating water column	80	64
Pneumatic to mechanical	Wells turbine	60 (average)	40 (average)
Mechanical to electrical	Generator	100 *	32
Overall efficiency		48 (average)	8

Tabella 4.2: efficienze di Limpet

I vantaggi offerti dal Limpet sono:

- bassi costi di manutenzione;
- facile costruzione ed installazione;
- controllo a distanza via modem;
- facile connessione alla rete elettrica;
- non presenta un grande impatto visivo grazie al profilo basso;
- elementi prefabbricati per la sala turbine;

4.2.2 Pico



Figura 4.6: Pico

Pico è un OWC shoreline di 400kW installato in una piccola gola naturale vicino a Porto Cachorro sull'isola di Pico, nelle Azzorre (Portogallo).

L'impianto è costituito da una struttura in calcestruzzo rinforzato (camera d'aria) posta sopra il pelo libero dell'acqua, comunicante col mare mediante un'apertura sommersa presente nel corpo della struttura, e con l'atmosfera mediante un condotto in fibre contenente una turbina ad aria. Le onde incidenti generano all'interno della camera l'oscillazione verticale della colonna d'acqua e quindi un flusso d'aria bidirezionale, che alimenta una turbina Wells ad asse orizzontale, collegata ad un generatore. L'elettricità prodotta da tale convertitore viene immessa nella rete elettrica nazionale di EDA (compagnia regionale).

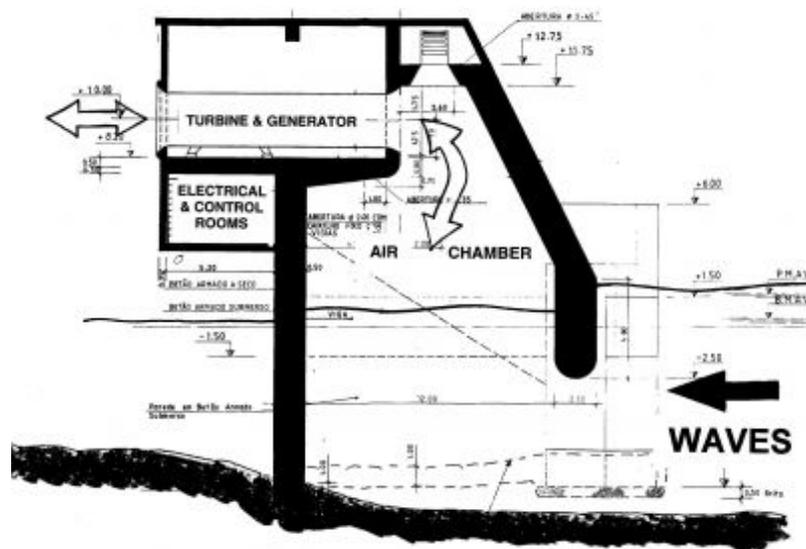


Figura 4.7: schema di funzionamento di Pico

In Tabella 4.1 sono sintetizzate le principali caratteristiche di progetto.

Geometry		Wave / Sea Characteristics	
Total Width	12.0m	Depth	8m at lip, 8 – 10m approach
No. of Chambers + Width	1 x 12.0m	Design Wave Height	7.5m
Chamber Angle	60° to horiz.	Design Wave Period	12.0s
Lip depth below MWL	2.5m	Return period	
Total Height above MWL	15.0m	Max design wave load	700kN/m ²
Turbine		Generator	
Turbine Dia.	2.3m	Type	Induction, Wound Rotor, Kramer
Nominal operating speed	750 – 1500rpm	Power at Generator Terminals,	400kW
No. of Turbines	1	Duty Type	50Hz, 8 Pole
Arrangement	Horiz. axis	Rotor Type	Wound, slip rings
Blade Form	3D symmetrical NACA15 at root and NACA12 at tip	Rated Voltage	400V
Number of blades	8	Rated Speed	1400 RPM
Blade Chord	375mm	Max test speed	1500 RPM
Hub to tip ratio	0.59	Inertia	600kgm ²

Tabella 4.3: caratteristiche di progetto di Pico.

In Tabella 4.2, invece, sono espresse le efficienze dello strumento.

Type of energy conversion	Structure / device	Estimated Efficiency %	Measured Efficiency %
Wave to pneumatic (measured at lip)	Oscillating water column	NA	NA
Pneumatic to mechanical	Horizontal axis Wells turbine	75 (peak)	NA
Mechanical to electrical	Wound rotor, induction Generator	NA	NA
Overall efficiency		35 (average)	NA

Tabella 4.4: efficienza di Pico

I vantaggi offerti dal Pico sono:

- bassi costi di manutenzione;
- facile costruzione ed installazione;
- facile connessione alla rete elettrica.

4.2.3 Oceanlinx



Figura 4.8: Oceanlinx

Oceanlinx, sviluppato dalla compagnia australiana omonima, è un OWC near-shore installato a 200 m di distanza dal porto di Port Kembla (Australia), ed è caratterizzato da una potenza pari a 450 kW.

Tale dispositivo, lungo 36 m e largo 35 m, poggia su 4 gambe e prevede un sistema di ancoraggio. E' costituito da una camera che si presenta aperta sotto il livello del mare e che si restringe nella parte più alta, in modo che l'aria in ingresso alla turbina raggiunga elevate velocità. Al passaggio dell'onda, l'acqua si introduce nella camera e dà vita ad una oscillazione di livello, che genera pertanto la compressione e la decompressione dell'aria; nella parte superiore della camera, in corrispondenza del restringimento, è posizionata una turbina, che produce energia sfruttando tale movimento oscillatorio.



Figura 4.9: modello di Oceanlinx

In Tabella 4.5 sono sintetizzate le principali caratteristiche di progetto.

Geometry		Wave / Sea Characteristics	
Total Width	36.0m	Depth	8-16m
No. of Chambers + Width	1 x 10m	Design Wave Height	7.0m
Chamber Angle	vertical rear, approx 45° front	Design Wave Period	9 to 12s
Lip depth below MWL	3.0m	Return period	100 year
Total Height above MWL	12m	Max design wave load	
Turbine		Generator	
Turbine Dia.	1.6m	Type	Squirrel cage/induction
Nominal operating speed	500rpm	Power at Generator Terminals	200/300kW
No. of Turbines	1	Duty Type	50Hz, 12-pole
Arrangement	horizontal axis	Rotor Type	Cage
Blade Form		Rated Voltage	415 V
Number of blades (variable pitch)	21 blade	Rated Speed	500RPM
Blade Chord		Max test speed	750RPM
Hub to tip ratio	0.75	Inertia	

Tabella 4.5: caratteristiche di progetto di Oceanlinx

In Tabella 4.6, invece, sono espresse le efficienze dello strumento.

Type of energy conversion	Structure / device	Estimated Efficiency %	Measured Efficiency %
Wave to pneumatic	Oscillating water column	67	NA
Pneumatic to mechanical	Denniss-Auld turbine	54 average 80 peak	NA
Mechanical to electrical	Not known	90	NA
Overall efficiency		32.4 (average)	NA

Tabella 4.6: efficienze di Oceanlinx

I vantaggi offerti dall'Oceanlinx sono:

- Impiego di una turbina innovativa, la Denniss-Auld; sviluppata dalla compagnia Oceanlinx, questa turbina risulta rivoluzionaria, sia perché è molto più

efficiente nel convertire l'energia presente nel flusso d'aria in elettricità, sia perché permette di superare i problemi legati al flusso bidirezionale dell'aria nei dispositivi OWCs, disponendo di un sistema di controllo che le permette di ruotare in un'unica direzione indipendentemente dal verso del flusso d'aria.

- Semplicità: l'Oceanlinx presenta una sola parte che sfrutta il movimento. Tutti i dispositivi tecnologici operano sopra il livello dell'acqua, accrescendo così l'affidabilità e consentendo una facile manutenzione .
- Utilizzo di tecnologie per la produzione energetica e per la desalinizzazione semplici ed efficaci dal punto di vista dei costi, essendo costituite da parti elettriche e meccaniche prodotte in serie.
- Uso di un sistema per la generazione dell'energia ampiamente collaudato, frutto di 30 anni di studio.

4.2.4 Sakata, Japan



Figura 4.10: Fase di costruzione del dispositivo.

Questo progetto prevede un OWC di 5 camere inglobato nella struttura frangiflutti del Porto di Sakata in Giappone.

Le dimensioni di ciascun cassone sono 20 m x 24,5 m x 27,0 m di altezza, e opera a profondità del fondale di 18 m. Ciascun cassone presenta un muro che si affaccia sul

mare aperto, con un'inclinazione di 45°, al fine di stabilizzare il cassone stesso. Su ciascun muro sono applicate delle aperture collegate con le camere d'aria. Lo spazio interno è diviso in 5 camere da dei muri di partizione.

Il dispositivo è stato reso operativo nel 1989, ma dopo un periodo di prova, sono state utilizzate solo 3 camere d'aria per la produzione di energia. Come unità di generazione di potenza è stato installato un sistema turbo generatore da 60 kW a fini dimostrativi e di studio. In futuro, questo sarà sostituito da una turbina più grande da 130 kW.

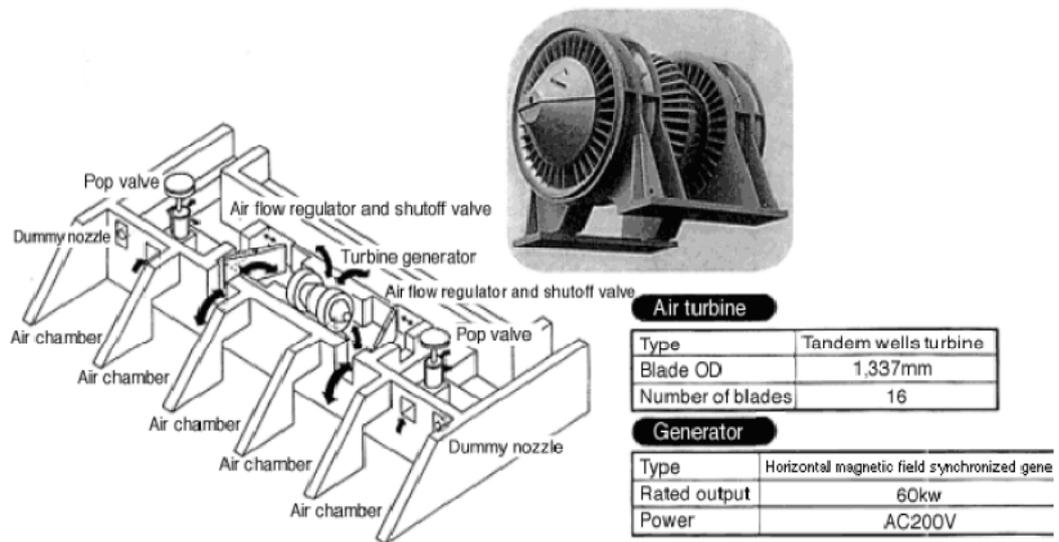


Figura 4.11: schema del dispositivo

In Tabella 4.5 sono sintetizzate le principali caratteristiche di progetto.

Geometry		Wave / Sea Characteristics	
Total Width	20.0m	Depth	18.0m
No. of Chambers + Width	5 x 3m	Design Wave Height	15.3m
Chamber Angle	Wave chamber – vert, air 45°	Design Wave Period	14.5s
Lip depth below MWL	3.0m	Return period	
Total Height above MWL	12.5m	Max design wave load	
Turbine		Generator	
Turbine Dia.	1.337m	Type	
Nominal operating speed		Power at Generator Terminals	60kW
No. of Turbines		Duty Type	
Arrangement		Rotor Type	
Blade Form		Rated Voltage	200V AC
Number of blades	16	Rated Speed	
Blade Chord		Max test speed	
Hub to tip ratio		Inertia	

Tabella 4.7: caratteristiche di progetto del dispositivo

4.3 Offshore OWCs

Si tratta di dispositivi galleggianti disposti lontano da riva, in mare aperto. Operano secondo lo stesso principio di funzionamento degli OWC's on-shore. Gli OWC's off-shore presentano il vantaggio di funzionare in acque profonde e quindi di sfruttare al massimo l'energia ondosa, che in condizioni d'acqua alta si presenta maggiore.

4.3.1. Mighty Whale

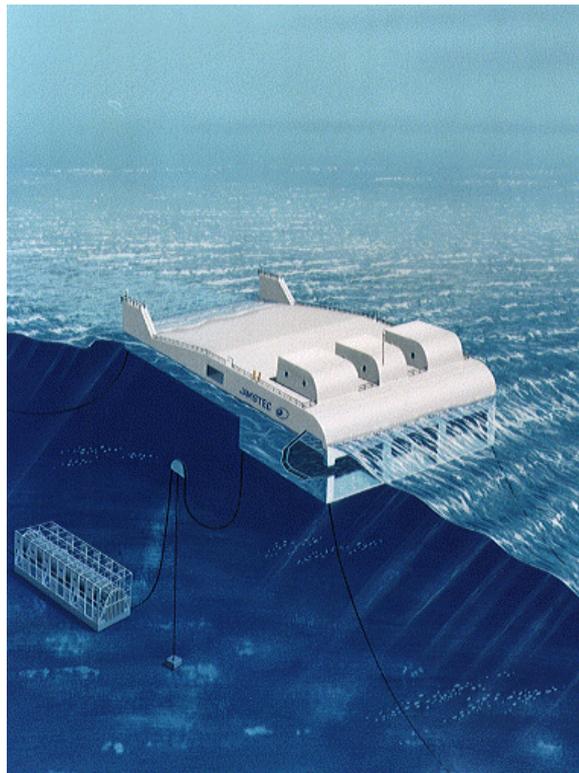
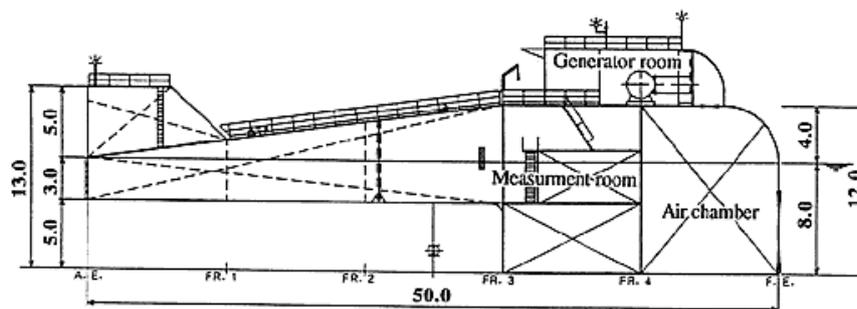


Figura 4.12: Mighty Whale

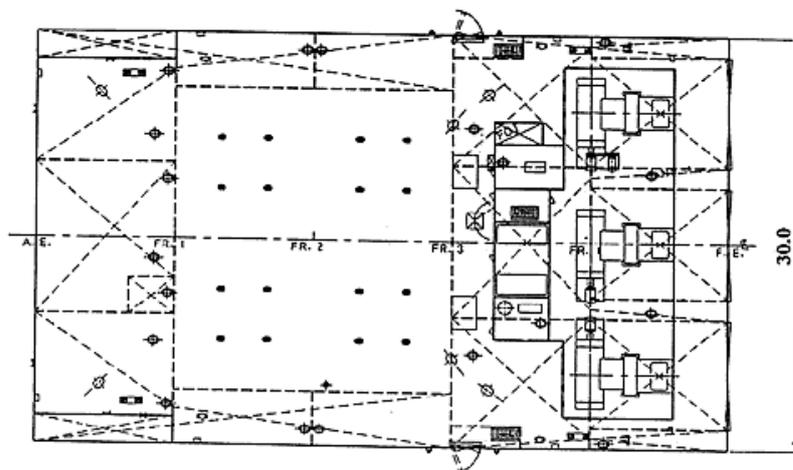
Mighty Whale è un OWC galleggiante che opera in condizioni offshore, sviluppato dalla compagnia giapponese JAMSTEC a partire dal 1987 ed installato a largo di Gokasho Bay off Mie Prefecture (Giappone). Le dimensioni del prototipo sono: 50 m di lunghezza x 30 m di larghezza x 12 m di profondità, con un' immersione di 8 m.

Tale prototipo è stato installato in un sito caratterizzato da una profondità dell'acqua di 40 m, ed è stato ancorato in modo che sia rivolto verso la direzione predominante delle onde. La capacità energetica massima stimata è di 110 kW.

Mighty Whale è costituita principalmente da 3 camere d'aria, ciascuna collegata ad una turbina. L'azione delle onde determina l'innalzamento e l'abbassamento del livello dell'acqua all'interno delle camere, e pertanto una variazione di pressione dell'aria, che genera un flusso bidirezionale attraverso le turbine. Tre camere di galleggiamento sono disposte direttamente dietro alle camere d'aria, due lungo i lati del dispositivo, e tre nella zona più a poppa, alle cui estremità sono disposte due alette verticali, che garantiscono la stabilità laterale del dispositivo. Nella camera di galleggiamento davanti ed in posizione centrale, è inoltre alloggiata una camera di controllo, che funge da stazione di misurazione di bordo e che contiene il sistema di controllo per le turbine ed i generatori.



Side view



Plan view

(unit:m)

Figura 4.13: sezione e pianta di Mighty Whale

In tabella 4.8 sono riportate le caratteristiche del sistema di generazione di potenza

Wells turbines : 3 sets	
Rated output	30kW 900rpm
Max RPM	2000rpm
Configuration	tandem type (with guide vane)
Blades	NACA0021 (8 blades)
Tip diameter	1700mm
Hub diameter	1200mm
Materials	Corrosion resisting Aluminum alloy
Weight	480kg(approx.)/turbine
Safety valve : 3 sets	
Electric motor drive	
Generators : 4 sets	
Rated output	30kW × 2 up to 900rpm
	50kW up to 1200rpm
	10kW up to 900rpm
Operating PRM	500 – 2000rpm
Type	3-phase Squirrel-cage Induction Type
Converter	PWM: Pulse Width Modulation
Output voltage	DC300V
Inverter for loads : 2sets	
Input voltage	DC260 320V
Output voltage	20kVA AC200V 3phase 60Hz
Type	Air cooled grid type
Capacity	No.1 45kW
	No.2 65kW

Tabella 4.8: caratteristiche del sistema di generazione di potenza

In Tabella 4.9 sono riportati invece i parametri caratteristici.

Measuring Parameter	Measuring Range	Parameter Precision	Measuring Instrument
Water level inside air chamber	0~12m	DC±5V	Capacitance type wave height meter
Air pressure inside air chamber	-10~20mAq	DC±10V	Strain gage type pressure transducer
Turbine pressure drop	±1.0mAq	DC±5V	Strain gage type differential pressure gage
Turbine torque	±50kgf·m	DC±5V	Electromagnetic type torque detector
Turbine rotational Speed	0~3000r.p.m.	DC 0~5V	magnetic type rotation detector
Generated Output	No.1 No.2,3	0~60 k W 0~40 k W	DC 0~5V digital power meter

Tabella 4.9: parametri caratteristici di Mighty Whale

4.3.2. SWEC

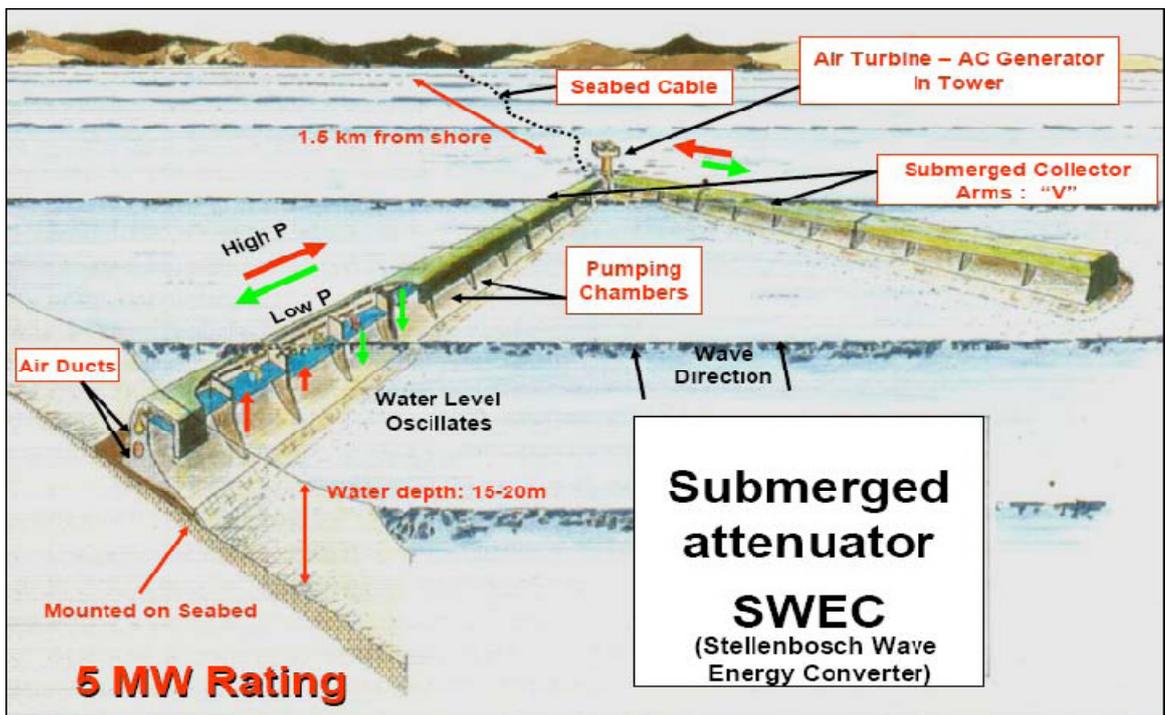


Figura 4.14: SWEC

SWEC (Stellenbosch WEC) è un dispositivo OWC galleggiante, sviluppato dall'Università Stellenbosch sul finire degli anni '80, e studiato per un'eventuale installazione a largo delle coste dell'Africa del Sud. Esso è in grado di produrre sino a 500 MW.

SWEC è costituito da un paio di braccia (collettori) collegati, in un'unica struttura a V, ad una singola turbina ad aria e ad un generatore, montati sopra una torre in corrispondenza della punta della V. Le braccia presentano una lunghezza di 300 m ed un'apertura di 30°, e sono costituite da elementi in calcestruzzo prefabbricato. Ciascun braccio comprende un tubo ad alta pressione ed un tubo a bassa pressione, con delle camere OWC. La cresta dell'onda comprime la sacca d'aria intrappolata in ciascuna camera e determina l'apertura della valvola ad alta pressione, permettendo così all'aria di fluire nel tubo ad alta pressione in direzione della turbina; nella fase in cui passa il cavo dell'onda, invece, avviene l'apertura della valvola a bassa pressione e l'aria fuoriesce dal tubo a bassa pressione.

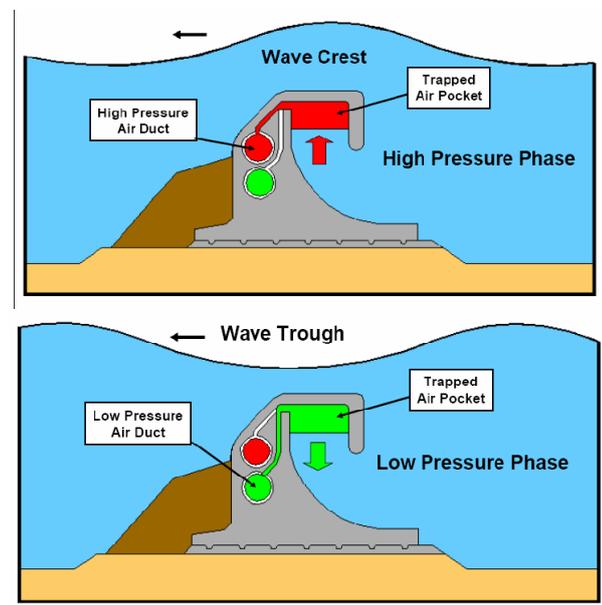


Figura 4.15: principio di funzionamento di SWEC

4.3.3. Sperboy



Figura 4.16: Sperboy

Sperboy è un WEC galleggiante che funziona secondo il principio OWC in condizioni offshore, ed è stato sviluppato dalla compagnia Embley Energy.

Sperboy prevede una struttura galleggiante con una colonna sommersa. Sopra l'OWC, sulla cima della boa, è alloggiato tutto l'impianto, ovvero turbine, generatori e l'insieme di attrezzature associate. Sperboy utilizza materiale galleggiante in modo da permettere il suo galleggiamento, e prevede numerosi cavi che lo mantengano ad un'altezza costante. All'interno dello strumento è presente un coulomb d'aria che oscilla al passaggio dell'onda. L'energia viene estratta dall'oscillazione dell'aria tramite una turbina che a sua volta trasferisce energia al generatore.

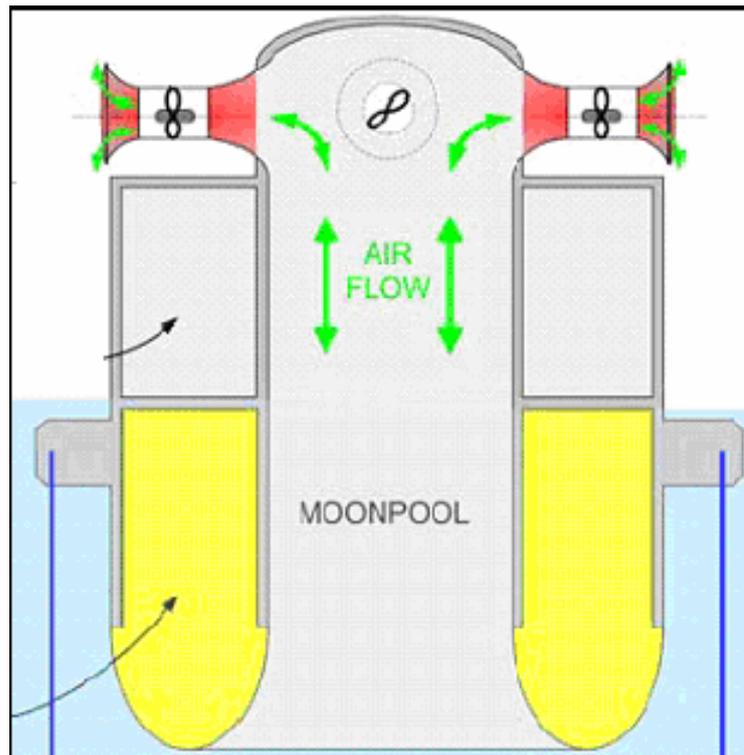


Figura 4.17: principio di funzionamento di Sperboy

II. PARTE:

ATTIVITA' SPERIMENTALE CONDOTTA SUL LEANCON

Capitolo 5

Dispositivo e obiettivi preposti

5.1 Leancon

5.1.1 Introduzione

Oggetto del mio studio sperimentale è un convertitore di energia ondosa di tipo OWC, denominato Leancon.

Leancon è un WEC sviluppato dal gruppo LEANCON Wave Energy. Si tratta di un dispositivo galleggiante, che funziona in condizioni offshore, di tipologia MAWEC (Multi Absorbing Wave Energy Converter), OWC (Oscillating Water Column). Si differenzia dagli altri WEC's esistenti per il fatto che è mantenuto giù da forze di aspirazione previste dal funzionamento del dispositivo stesso, e non richiede pertanto costi elevati per i materiali, che infatti possono risultare anche leggeri (ad esempio il poliestere rinforzato in fibra di vetro).

Alcuni fattori chiave che hanno determinato lo sviluppo di questo WEC sono:

- Alta efficienza
- Leggero
- Semplicità di funzionamento
- Bassi costi di produzione
- Basso impatto delle onde sullo strumento

Il dispositivo, così come oggi si presenta, è il risultato di numerosi tests e misurazioni, condotte su diversi modelli a scala 1:40 in laboratorio in una vasca delle onde alta 5 metri.



Figura 5.1: Leancon

5.1.2 Principio di funzionamento

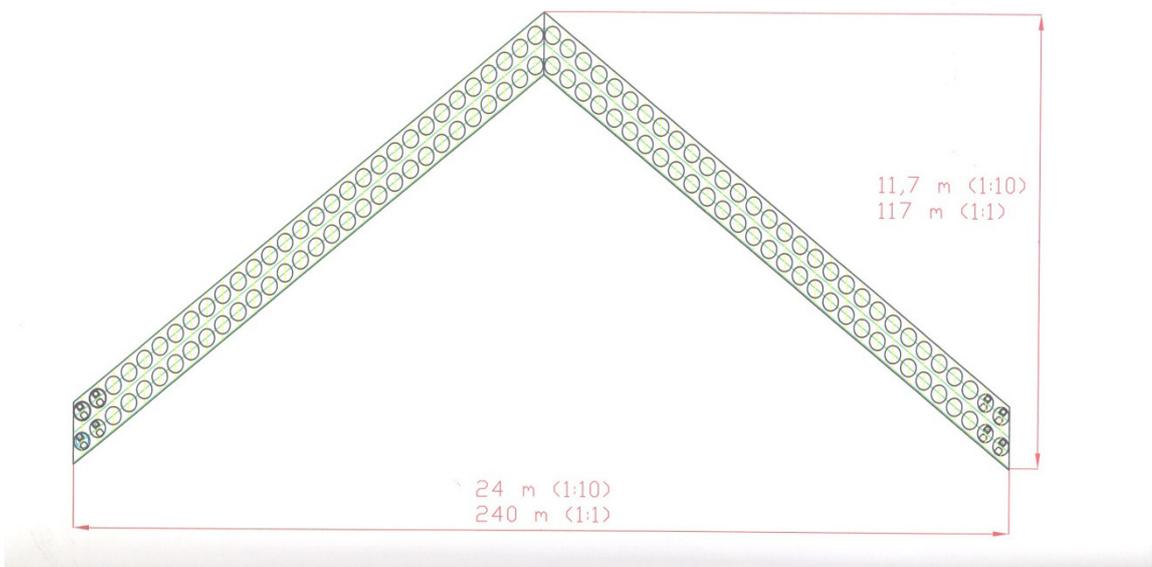


Figura 5.2: Pianta del Leancon

Leancon è un convertitore da energia ondosa MAWEC (Multi Absorbing Energy Converter), della classe OWC (Oscillating Water Column) funzionante in condizioni nearshore. E' una piattaforma galleggiante a forma di V costituita da 2 braccia, inclinate di 40° rispetto al fronte dell'onda ed ancorata al fondo in corrispondenza della punta della V. Ciascun braccio è composto da 60 tubi disposti in 2 file e ciascun tubo è in comunicazione, superiormente, con due canali, paralleli tra loro, uno di pressione ed uno di aspirazione. Tra i due canali, di pressione e aspirazione, lungo il braccio, sono previsti dei 4 sistemi di generazione elettrica comprendenti una turbina ed un generatore.

Quando un tubo incontra la cresta dell'onda, questa comprime l'aria sovrastante determinando così l'apertura di una valvola di non ritorno e l'ingresso dell'aria nel canale di pressione. Tra il canale di pressione e quello di aspirazione vi è un sistema turbina- generatore, pertanto l'aria raccolta nel canale di pressione alimenta la turbina che estrae l'energia dall'aria.

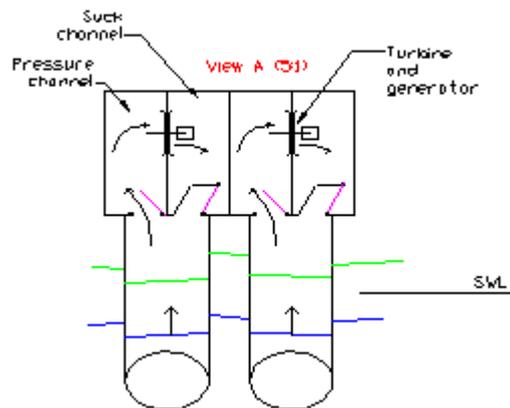


Figura 5.3: principio di funzionamento del canale di pressione

L'aria che ha alimentato la turbina si raccoglie nel canale di aspirazione e quando il tubo incontra il cavo dell'onda, l'aria a bassa pressione presente nel canale di aspirazione fluisce dal canale al tubo passando attraverso una valvola di non ritorno. La presenza di valvole di non ritorno fa sì che il flusso d'aria sia in un'unica direzione e pertanto permette l'utilizzo di una turbina tradizionale unidirezionale con efficienze maggiori rispetto alle turbine Wells, generalmente impiegate nei sistemi OWCs.

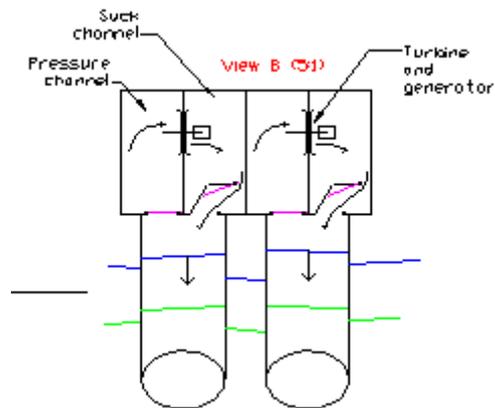


Figura 5.4: principio di funzionamento del canale di aspirazione

In Figura 4.3 è mostrato un lungo braccio con 2 file di 30 tubi in condizioni ondose tali per cui il braccio si estende per una lunghezza superiore ad una lunghezza d'onda. Il braccio si presenta suddiviso in zone di aspirazione (suck) ed in zone di pressione (pressure), e in questa situazione ideale, 2 file di 15 tubi comprimono aria nel canale di pressione, e 2 file di 15 tubi aspirano aria dal canale di aspirazione. Durante un periodo d'onda ciascuno dei 60 tubi prima spinge aria nel canale in pressione, quando l'onda sale, poi aspira aria dal canale di aspirazione, quando l'onda cade. Pertanto sul braccio agiscono 2 forze: una rivolta verso l'alto (forza di compressione) ed una rivolta verso il basso (forza di aspirazione). Qualora il braccio si estendi per una lunghezza superiore ad una lunghezza d'onda, tali forze verticali tendono ad annullarsi, impedendo così che il WEC si sollevi dalla cima dell'onda. Ciò permette di realizzare un apparecchio con un materiali più leggeri ed un ancoraggio più piccolo e pertanto di ridurre i costi di produzione.

In questa situazione, inoltre, la pressione nei canali di pressione e di aspirazione risulta costante, e perciò anche il flusso d'aria attraverso le turbine risulta costante.

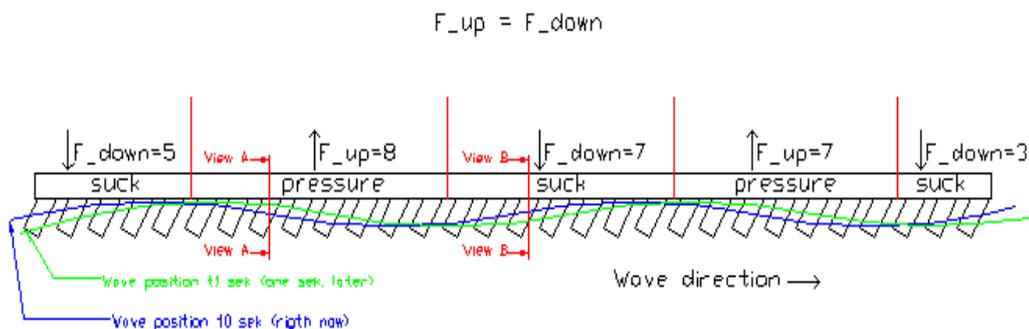


Figura 5.5: sezione del Leancon

Questo dispositivo è ancorato in corrispondenza della punta, e si dispone automaticamente in direzione del fronte d'onda nel momento in cui le 2 risultanti delle forze esercitate dalle onde su ciascun braccio, non si eguagliano annullando il momento alla punta. Secondo tale disposizione il WEC si estende per una lunghezza superiore ad una lunghezza d'onda (Figura 4.4).

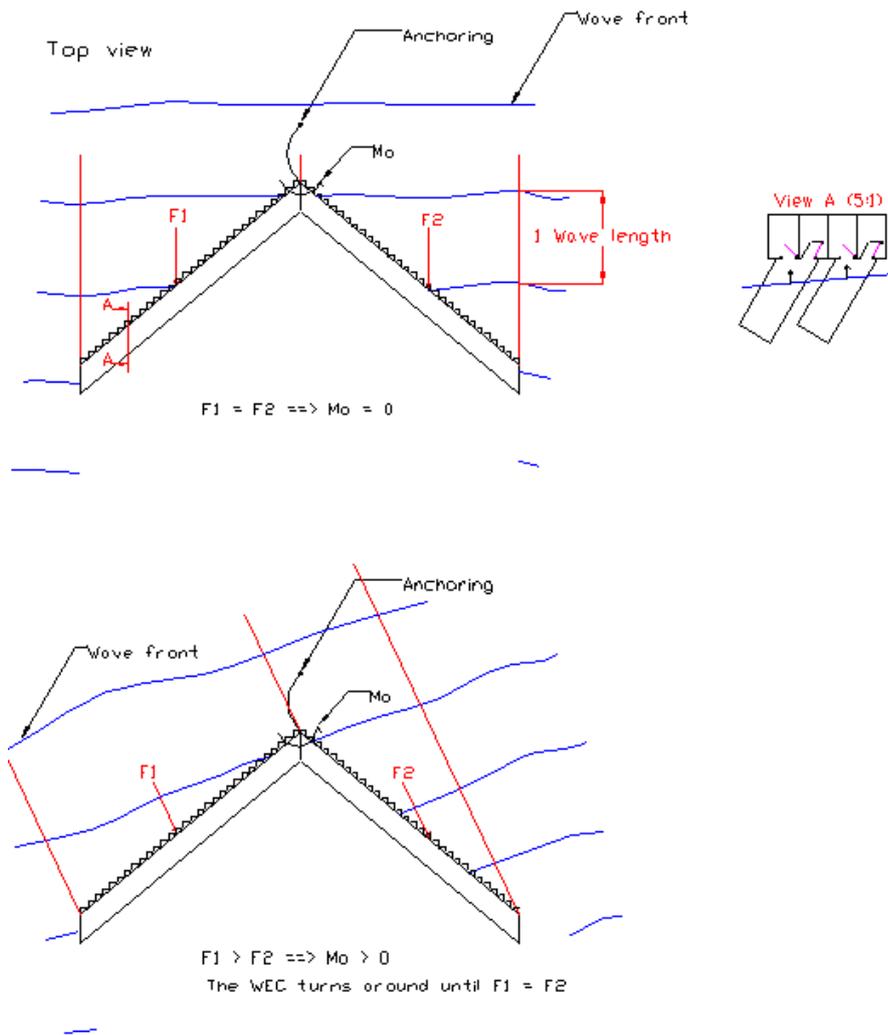


Figura 5.6: schema di assestamento del Leancon

5.2 Obiettivi dell'attività sperimentale

Lo studio sperimentale condotto sul Leancon si pone come obiettivo fondamentale quello di analizzare la potenza estraibile da tale dispositivo. Nello specifico, due sono le finalità del lavoro portato a compimento.

- ✓ Analizzare l'efficienza del dispositivo, mediante tests eseguiti su un modello in scala 1:40 per una realistica combinazione di condizioni ondose.
- ✓ Stimare la produzione di energia annua del dispositivo, ipotizzando una sua installazione nel porto di Cagliari.

Lo studio che ha permesso il raggiungimento di tali obiettivi si è sviluppato principalmente in tre fasi.

- I. La prima fase si è svolta mediante una serie di acquisizioni in laboratorio, necessarie al fine di ricavare dati utili per le fasi successive.
- II. Nella seconda fase del lavoro si è andati a elaborare i dati acquisiti in laboratorio e, partendo da tali dati, sono stati studiati alcuni aspetti di grande rilevanza, al fine di comprendere il comportamento e le prestazioni del dispositivo.
In particolare tre sono gli studi eseguiti in questa fase:
 - a) Studi degli spettri delle onde riflesse e delle onde incidenti
 - b) Analisi del campo d'onda davanti e di fianco al dispositivo
 - c) Studio della rapidità di risposta del sistema.
- III. L'ultima fase del lavoro ha rappresentato la fase cruciale dell'intero studio, in quanto ha permesso la valutazione effettiva dell'efficienza del dispositivo.

Capitolo 6

Fase di acquisizione dei dati in laboratorio

6.1 Setup di laboratorio

I tests sono stati condotti su un modello in scala 1:40 nella vasca delle onde 3-D del laboratorio di Ingegneria Civile dell'Università di Aalborg.

La vasca presenta una larghezza di 8,5 m, una lunghezza di 15,7 m ed una profondità di 1,5 m. Le onde sono azionate mediante un dispositivo automatico denominato *battionde* e frangono, all'estremità opposta, su una *spiaggia artificiale* in ciottoli, che ha la funzione di dissipare l'energia delle onde create in vasca.



Figura 6.1: La vasca delle onde.

Il modello in scala 1:40 è realizzato in vetroresina, e prevede complessivamente 120 tubi (collettori OWC), disposti su 2 file, sotto due travi connesse in un'unica struttura

a forma di V. La larghezza, individuata dall'apertura delle braccia, è pari a 6 m e la lunghezza di ogni singolo braccio è pari a 29,25 m.

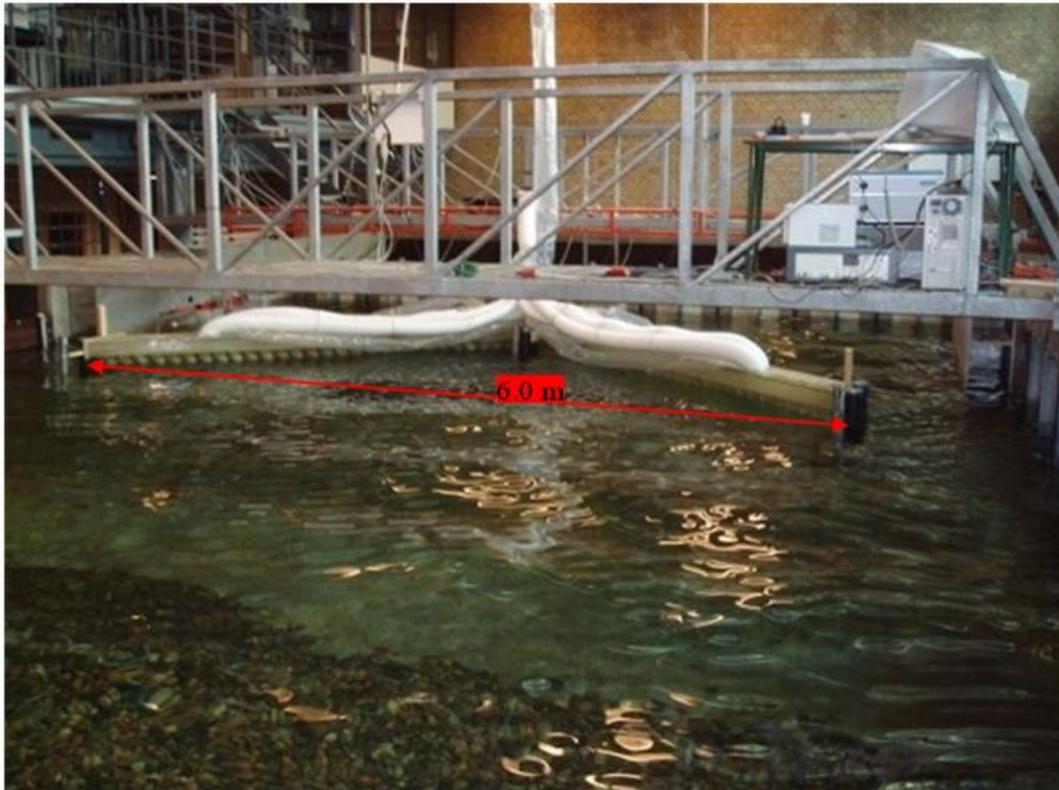


Figura 6.2: Modello del Leancon in scala 1:40.

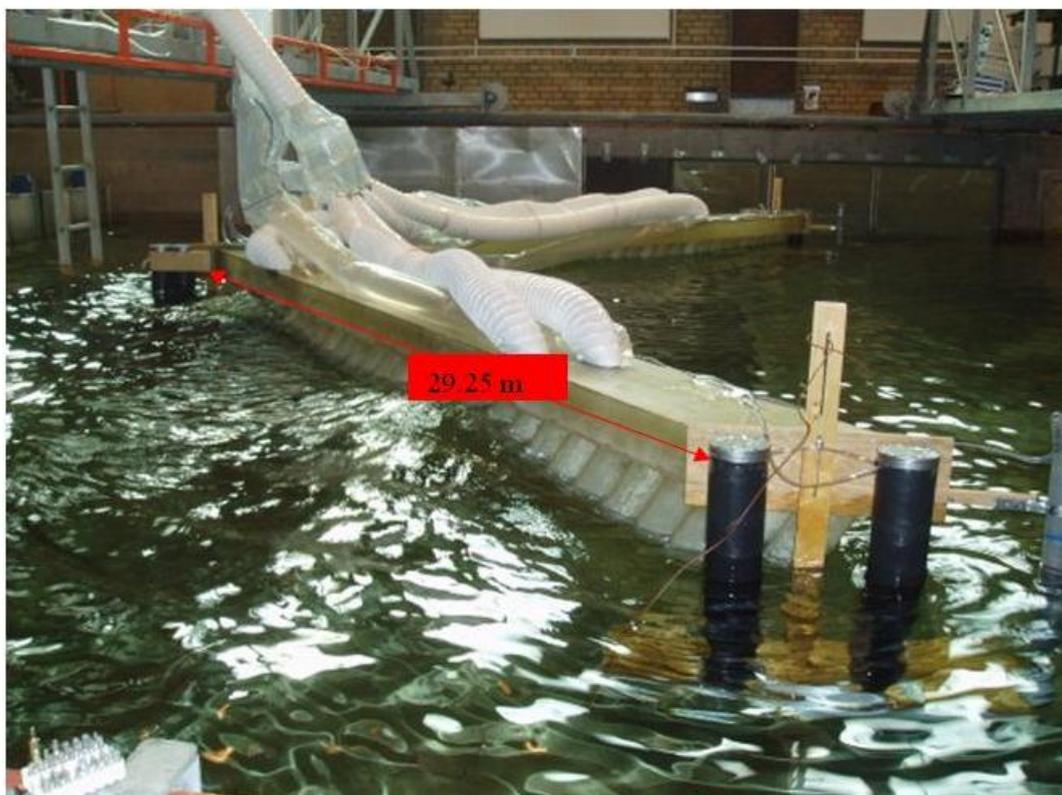


Figura 6.3: Modello del Leancon in scala 1:40.

In condizioni reali di funzionamento è previsto che le turbine ed i generatori siano posti nelle camere inserite nel corpo della struttura, in corrispondenza di 8 punti diversi. In quest'assetto di laboratorio, invece, non viene impiegata alcuna turbina, ma i canali che vedono l'ingresso dell'aria sono collegati ad un tubo (tubo di ingresso dell'aria) e i canali che vedono l'uscita dell'aria sono collegati ad un secondo tubo (tubo di uscita dell'aria), mediante l'impiego di tubi bianchi flessibili che convogliano il flusso d'aria ad un punto centrale di misurazione. La potenza assorbita dal dispositivo è misurata indirettamente attraverso la misurazione:

- della pressione nel tubo di ingresso dell'aria p_e
- della pressione nel tubo di uscita dell'aria p_i
- della velocità del flusso d'aria nel tubo di uscita dell'aria v

secondo la formula 6.1.

$$P(t) = (p_e(t) - p_i(t))v(t) \quad (6.1)$$

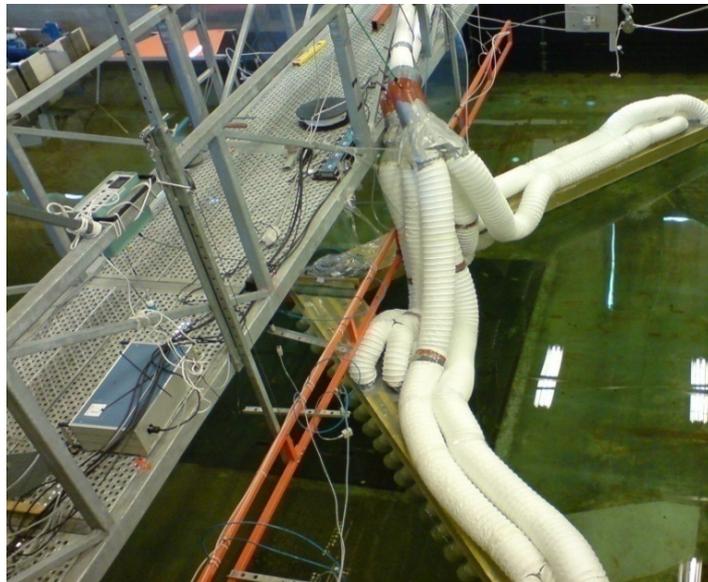


Figura 6.4: Tubi bianchi flessibili che convogliano il flusso d'aria ad un punto centrale.

Il dispositivo è stato testato in tre differenti configurazioni:

- *Fissato al fondo (Bottom fixed)*: il dispositivo è fissato al fondo mediante l'impiego di 3 gambe poste in corrispondenza dei vertici.
- *Galleggiante con l'impiego di piatti (Floating with plate)*: il dispositivo galleggia, ovvero non è in comunicazione col fondo della vasca; in corrispondenza della punta della V è ancorato, mediante una molla, a un'asta fissata ad una passerella. Poiché il dispositivo, in proporzione, è più pesante del prototipo a piena scala, la struttura per galleggiare necessita di galleggianti, che nel caso specifico sono costituiti da dei piatti in polistirolo posti in corrispondenza dei vertici e collegati ad un sistema ad aria che permette di regolare l'immersione in acqua del dispositivo.



Figura 6.5: Configurazione galleggiante con l'impiego di piatti.

- *Galleggiante senza l'impiego di piatti (Floating no plates)*: anche in questo caso il dispositivo galleggia, ed è ancorato in corrispondenza della punta mediante una molla. La regolazione del draft è ottenuta inserendo all'interno dei tubi delle lastre di polistirolo che permettono alla struttura di galleggiare maggiormente, ma riducono il diametro dei tubi stessi.



Figura 6.6: Configurazione galleggiante senza l'impiego di piatti.

La configurazione che meglio descrive il funzionamento reale del dispositivo è quella galleggiante caratterizzata dall'impiego della sola molla; pertanto lo studio sperimentale è stato condotto considerando esclusivamente i dati relativi a tale assetto.

Durante le prove in vasca sono state effettuate una serie di misurazioni di livello, di pressione e di velocità.

Al fine di eseguire le misurazioni del livello dell'acqua, sono state installate in vasca *sonde di livello*: 4 sonde di livello sono state posizionate perpendicolarmente alla spiaggia, davanti al braccio destro (prendendo come punto d'osservazione la spiaggia) e 4 sonde di livello sono state disposte parallelamente alla spiaggia, davanti al braccio sinistro. Le 4 sonde WGR sono posizionate nella vasca delle onde, lungo l'asse X. Prendendo come origine degli assi il punto corrispondente alla sonda più vicina al battente (WGR1), le coordinate che m'individuano le sonde sono:

$$X_{WGR1}=0 \text{ m}$$

$$X_{WGR2}=0.15 \text{ m}$$

$$X_{WGR3}=0.40 \text{ m}$$

$$X_{WGR4}=1 \text{ m}$$

Le 4 sonde WGF sono posizionate nella vasca delle onde, lungo l'asse Y. Le distanze delle sonde dall'asse del Leancon sono:

$Y_{WGF1}=0.3 \text{ m}$

$Y_{WGF2} = 0.75 \text{ m}$

$Y_{WGF1} = 1.95 \text{ m}$

$Y_{WGF1} = 2.85 \text{ m}$



Figura 6.7: Disposizione delle sonde di livello durante le prove.

Come precedentemente accennato, al fine di ottenere indirettamente la potenza assorbita dall'apparecchio nel tempo, sono state eseguite misurazioni di pressione e di velocità. Nello specifico, si è misurata nel tempo la pressione dell'aria nel tubo di entrata e nel tubo di uscita e la velocità dell'aria, considerata costante, nel solo tubo di uscita.

$$P(t) = (p_e(t) - p_i(t))v(t) \quad (6.2)$$

Dove:

$p_i(t)$ =pressione nel tubo di entrata

$p_e(t)$ = Pressione nel tubo di uscita

$v(t)$ = velocità del flusso d'aria nel tubo di uscita

Le misurazioni di pressione, in entrambi i tubi, sono state effettuate impiegando dei sensori di pressione altamente sensibili, in grado di coprire il range di 0-500 Pa.

La velocità di flusso dell'aria nel tubo di uscita è stata misurata mediante un flussimetro termico (0-10 m/s), che è stato attentamente calibrato nella sezione del tubo considerata. Inoltre è stato utilizzato un rettificatore del flusso. A causa delle incertezze nelle misurazioni del flusso in condizioni di piccole velocità, saranno presenti inesattezze nella potenza misurata per gli stati ondosi più bassi.



Figura 6.8: Flussimetro termico.

6.2 Esecuzione delle prove

Le prove in vasca sono state condotte sulla struttura galleggiante, essendo quella che meglio rappresenta il reale funzionamento del dispositivo. Il modello testato è in scala 1:40, pertanto è stato necessario effettuare un cambiamento di scala su ciascuna delle grandezze entrate in gioco durante le prove. In particolare, nella Tabella 6.1, sono riportati i rapporti di scala utilizzati, ricavati attraverso un'applicazione della Legge di Froude. Poiché il peso e la distribuzione dei pesi del modello non sono in scala (il modello risulta più pesante rispetto alla versione scalata correttamente), i movimenti non sono perfettamente modellizzati.

Parameter	Model	Full Scale	1:40	1:10	1:4
Length	1.0	S	40	10	4
Area	1.0	S ²	1600	100	16
Volume	1.0	S ³	64000	1000	64
Time	1.0	S ^{0.5}	6	3.2	2
Velocity	1.0	S ^{0.5}	6	3.2	2
Force	1.0	S ³	64000	1000	64
Power	1.0	S ^{3.5}	404772	3162	128

Tabella 6.1: Rapporti di scala.

Come profondità dell'acqua in vasca, è stato adottato un valore pari a 0,73 m che corrisponde a 29,2 m a piena scala.

Sono stati riprodotti 5 differenti stati d'onda irregolari (altezza d'onda e periodo variano nel tempo), assunti come stati d'onda rappresentativi delle condizioni ondose che si presentano nel Mare del Nord. Nella Tabella 6.2 sono riportati i valori di Hs (altezza significativa) e Tp (periodo di picco) che caratterizzano ciascuno stato ondoso.

WS	Hs [m]	Tp [s]
1	0.024	0.89
2	0.054	1.11
3	0.078	1.33
4	0.106	1.55
5	0.146	1.77

Tabella 6.2: Stati d'onde irregolari riprodotti in laboratorio.

Un parametro molto importante, che influisce fortemente sull'efficienza del dispositivo, è il *draft* (immersione dei tubi in acqua). Nelle prove è stato adottato un valore di draft pari a 0,07m, poiché tests precedenti, condotti in condizioni d'onda regolari, hanno evidenziato le massime efficienze per valori d'immersione pari a 0,06-0,07 m.

Le misurazioni sono state registrate con una frequenza di 25 Hz per un periodo di acquisizione pari a 1800 s, ovvero 30 minuti.

Come già accennato, le prove sono state eseguite col fine di misurare il livello dell'acqua e la potenza assorbita dal dispositivo, ricavata indirettamente dalle misurazioni di pressione e di velocità del flusso d'aria.

Capitolo 7

Studi preliminari sui dati acquisiti

7.1 Studio degli spettri di onde riflesse e di onde incidenti

Attraverso le sonde di livello WGR, poste di fronte al Leancon, vengono misurate le altezze d'onda che si manifestano di fronte al dispositivo. Tali altezze sono il risultato di due contributi, quello delle onde incidenti, generate dal battente e caratterizzate da una certa altezza significativa nota, e quello delle onde riflesse. La riflessione è un fenomeno per cui una qualsiasi struttura posta lungo la traiettoria di propagazione delle onde, investita dal moto ondoso, può originare la riflessione delle onde stesse, spingendole pertanto a tornare indietro. Nel caso specifico delle prove condotte in laboratorio, la riflessione delle onde in vasca può essere causata sia dal dispositivo sia dalla spiaggia in ciottoli posta all'estremità della vasca. Tale fenomeno, legato in gran parte alle condizioni al contorno della vasca, può risultare significativo e pertanto invalidare i risultati dei tests stessi, determinando una sovrastima della potenza estraibile dal dispositivo. Pertanto, in questa prima fase di elaborazione dei dati, si è eseguita un'analisi di riflessione, ovvero si è cercato di isolare il fenomeno e di verificare che il contributo energetico offerto dalle onde riflesse fosse piccolo rispetto a quello delle onde incidenti. Lo studio del fenomeno di riflessione è stato condotto secondo due diverse modalità:

- Ricostruzione degli spettri d'onda
- Calcolo del coefficiente di riflessione

Nel primo caso, per ciascuno stato d'onda, si è confrontato il contenuto energetico delle onde incidenti con il contenuto energetico delle onde riflesse, mediante la ricostruzione dei relativi spettri d'onda.

Uno spettro d'onda fornisce indicazioni importanti sullo stato energetico delle onde cui fa riferimento e in generale è rappresentato da una curva che riporta, in funzione

della frequenza f ⁴, la densità spettrale di energia specifica contenuta dalle onde. L'area compresa tra la curva e l'asse delle ascisse f corrisponde all'energia specifica complessiva del moto ondoso; l'area sottesa dalla curva, a partire dalla frequenza f_{max} fino alla frequenza f generica, rappresenta l'energia compresa tra f_{max} e f . La massima densità di energia si ha per la frequenza di picco f_p , corrispondente al periodo di picco $T_p=1/f_p$.

La ricostruzione dello spettro delle onde incidenti e dello spettro delle onde riflesse, per ciascuno dei 5 stati d'onda considerati, è stata effettuata con l'ausilio del programma MATLAB, e si è svolta nel seguente modo:

Dalle misure di altezza d'onda rilevate dai 4 sensori di livello WGR, disposti perpendicolarmente rispetto alla spiaggia, è stato possibile risalire ai valori di altezza d'onda incidente e riflessa, costruendo in MATLAB una procedura apposita denominata REFLEXNG.

Una volta ricostruito l'andamento delle altezze per le onde incidenti e per le onde riflesse, è stato possibile ricostruire i due spettri energetici mediante la funzione *spectrum* di MATLAB.

I due spettri, nei 5 stati d'onda, sono stati pertanto confrontati e dal confronto è risultato che l'energia associata alle onde riflesse è di molto inferiore rispetto a quella associata alle onde incidenti. In Figura 7.1 sono riportati i due spettri d'onda relativi allo stato ondoso 1; si osservi come i valori di densità spettrale associati alle onde riflesse siano di uno/due ordini di grandezza inferiori rispetto a quelli delle onde incidenti.

⁴ Data una serie di onde, ciascuna onda risulta caratterizzata da un valore di periodo T , e pertanto da un valore di frequenza f , essendo $T=1/f$.

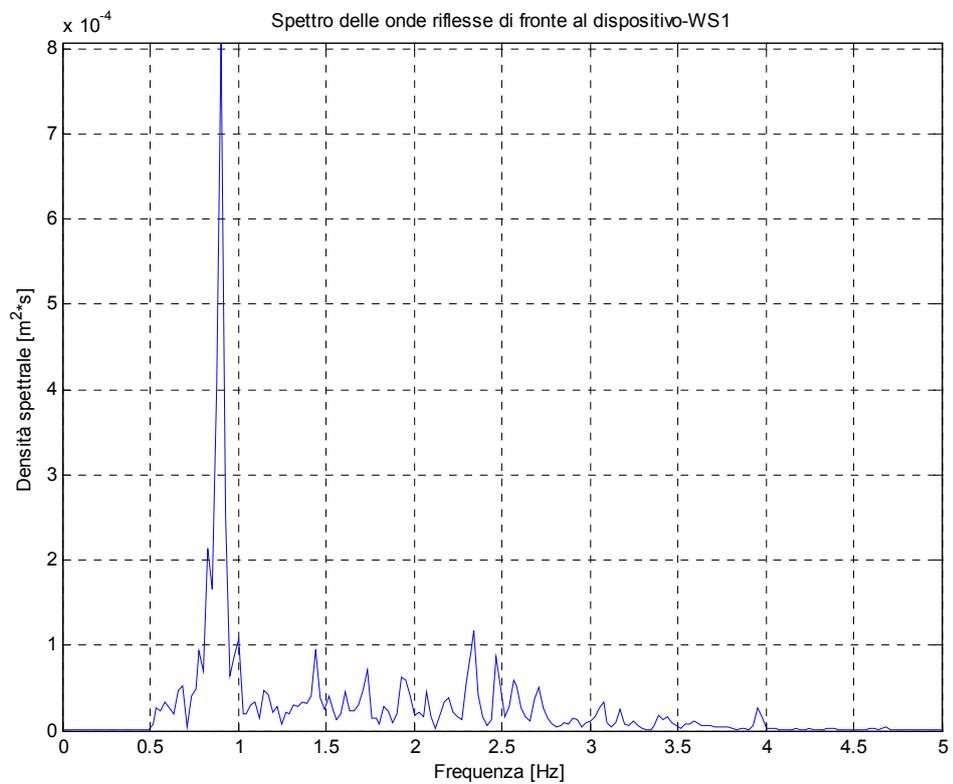
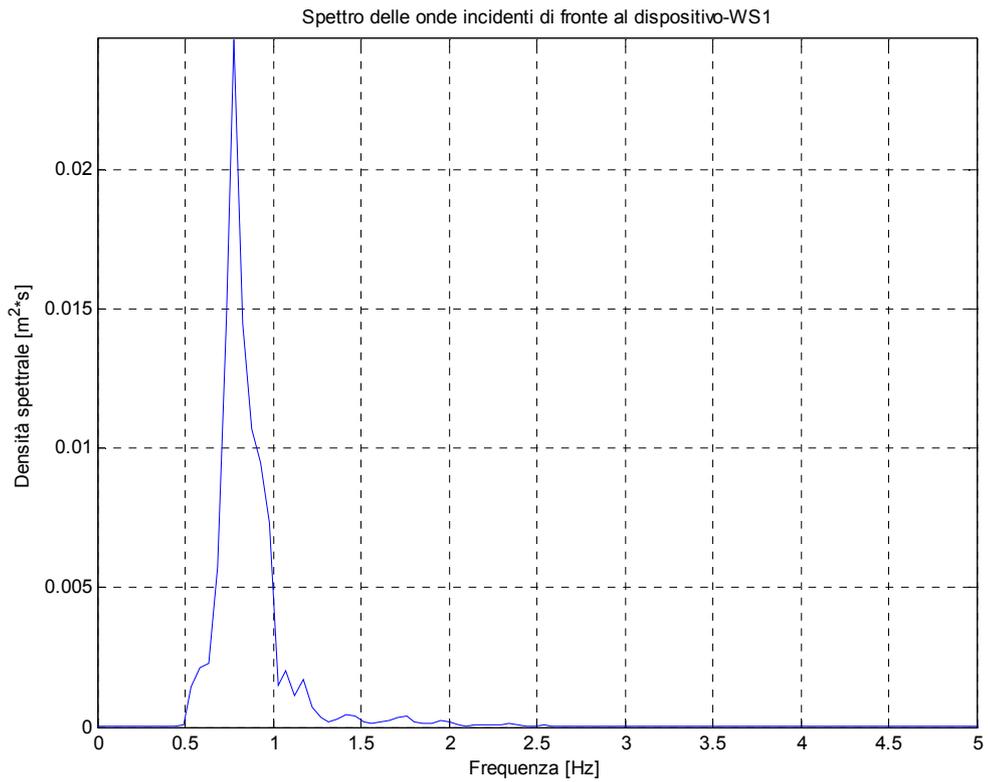


Figura 7.1: confronto tra lo spettro d'onda incidente e lo spettro d'onda riflessa, nel caso dello stato ondoso 1.

Come già accennato, i risultati ottenuti da questo confronto sono stati convalidati calcolando, per ciascuno stato ondoso, il valore del coefficiente di riflessione, parametro significativo del fenomeno. Noto l'andamento delle altezze d'onda si è calcolato il valore di deviazione standard delle altezze riflesse e delle altezze incidenti, quindi le relative altezze d'onda significative, e dal loro rapporto è risultato il coefficiente di riflessione K_r :

$$H_{si}=4\sigma_i$$

$$H_{sr}=4\sigma_r$$

$$K_r=H_{sr}/H_{si}$$

In Tabella 7.1 sono riportati i valori di K_r relativi ai 5 stati ondosi; tali valori, come si può osservare, sono molto piccoli, a dimostranza del fatto che le altezze d'onda riflesse sono molto inferiori rispetto all'altezza d'onda incidente.

	WS1	WS2	WS3	WS4	WS5
H_{si} [m]	0.0226	0.0518	0.0806	0.1029	0.1289
H_{sr} [m]	0.0065	0.0157	0.0134	0.0157	0.0215
K_r	0.2888	0.3027	0.1667	0.1526	0.1670

Tabella 7.1: caratteristiche della riflessione

Poiché quest'analisi di riflessione è stata eseguita ricostruendo analiticamente, dalle misure di livello delle 4 sonde, il segnale d'onda incedente e il segnale d'onda riflessa, è necessario che tale ricostruzione sia il più possibile fedele all'andamento reale del segnale. Pertanto, associato a questo studio di riflessione, è stato effettuato un confronto tra l'andamento delle altezze d'onda misurate dalla sonda 1 e l'andamento dei livelli della superficie dell'acqua ricostruito analiticamente andando a sommare, sulla base del principio di sovrapposizione degli effetti, le altezze d'onda incidenti e le altezze d'onda riflesse, ottenute in Matlab mediante la procedura REFLEXENG. In Figura 7.2 sono riportati i due segnali, ovvero quello reale e quello

ricostruito, relativamente allo stato ondoso 1. I due segnali si discostano tra loro in una forma accettabile e pertanto si può considerare la ricostruzione del segnale abbastanza buona.

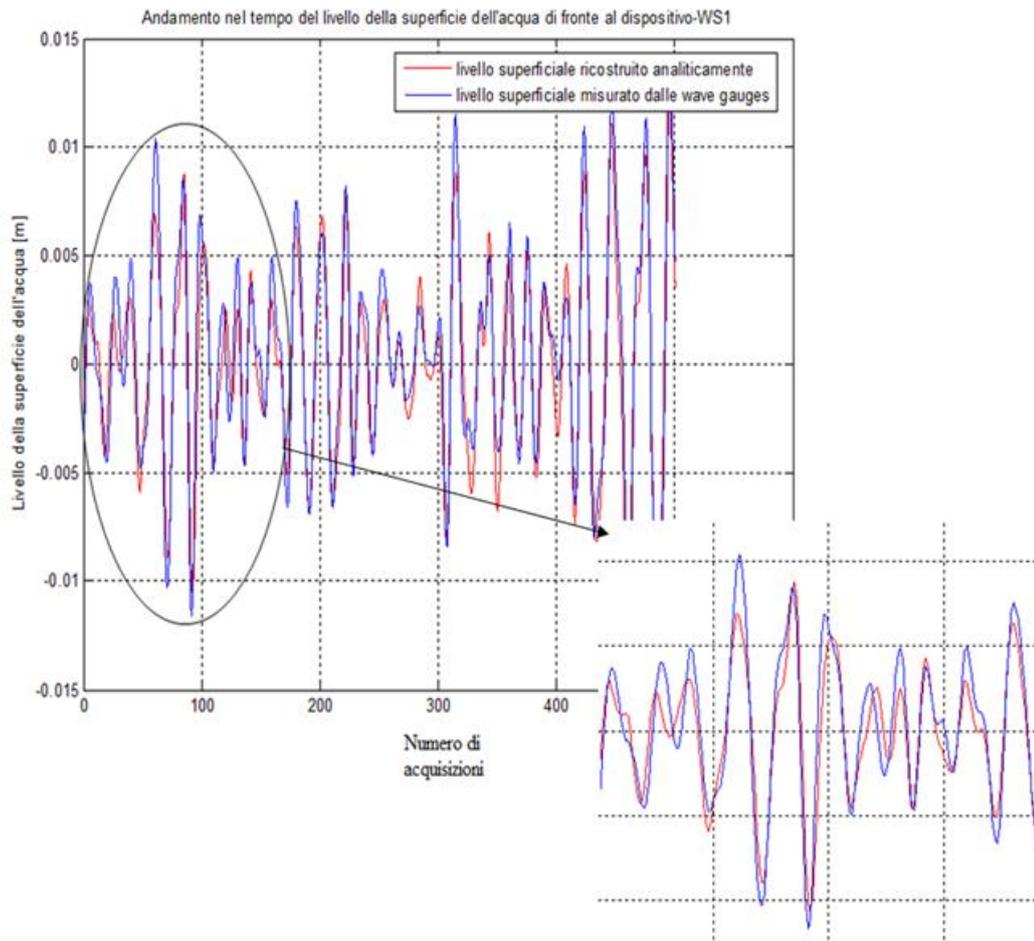


Figura 7.2: confronto tra l'andamento delle altezze d'onda misurate e l'andamento delle altezze d'onda ricostruito analiticamente.

7.2 Analisi del campo d'onda davanti e di fianco al Leancon

7.2.1 Analisi zero-down crossing per le sonde davanti al Leancon

Al fine di studiare il campo d'onda di fronte al Leancon, è stata ricostruita la distribuzione delle altezze d'onda e dei periodi d'onda relativi allo stato ondoso1, eseguendo un'analisi di tipo zero-down crossing.

L'analisi è stata condotta costruendo una procedura apposita in MATLAB, e si è sviluppata nelle seguenti fasi.

- E' stato spezzato il segnale acquisito in n porzioni, ciascuna compresa tra due escursioni dello stesso segno dal livello zero, individuando pertanto una serie di onde apparenti.
- Per ciascuna delle onde apparenti ottenute, si è determinato un valore di altezza H_i e di periodo T_i .

Il periodo T_i della generica onda apparente è definito come l'intervallo di tempo che intercorre tra i due attraversamenti dello zero, mentre l'altezza H_i è definita come la distanza verticale tra il cavo più basso e la successiva cresta più alta (down-crossing).

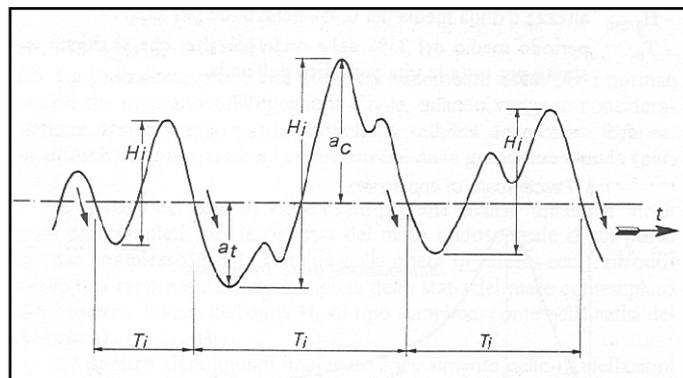


Figura 7.3: schema dell'analisi zero-down crossing.

$$H_i = \left[\max_{t_i < t < t_{i+1}} \eta(t) \right] - \left[\min_{t_i < t < t_{i+1}} \eta(t) \right]$$

$$T_i = t_{i+1} - t_i$$

- Una volta determinate le grandezze caratteristiche (H_i e T_i) di ciascun'onda apparente, le coppie di valori sono state rappresentate nel diagramma H-T.

In Figura 7.4 è rappresentato uno spezzone del segnale acquisito, nello stato ondosol, dalla sonda WGR1, suddiviso in onde apparenti secondo l'analisi zero-down crossing.

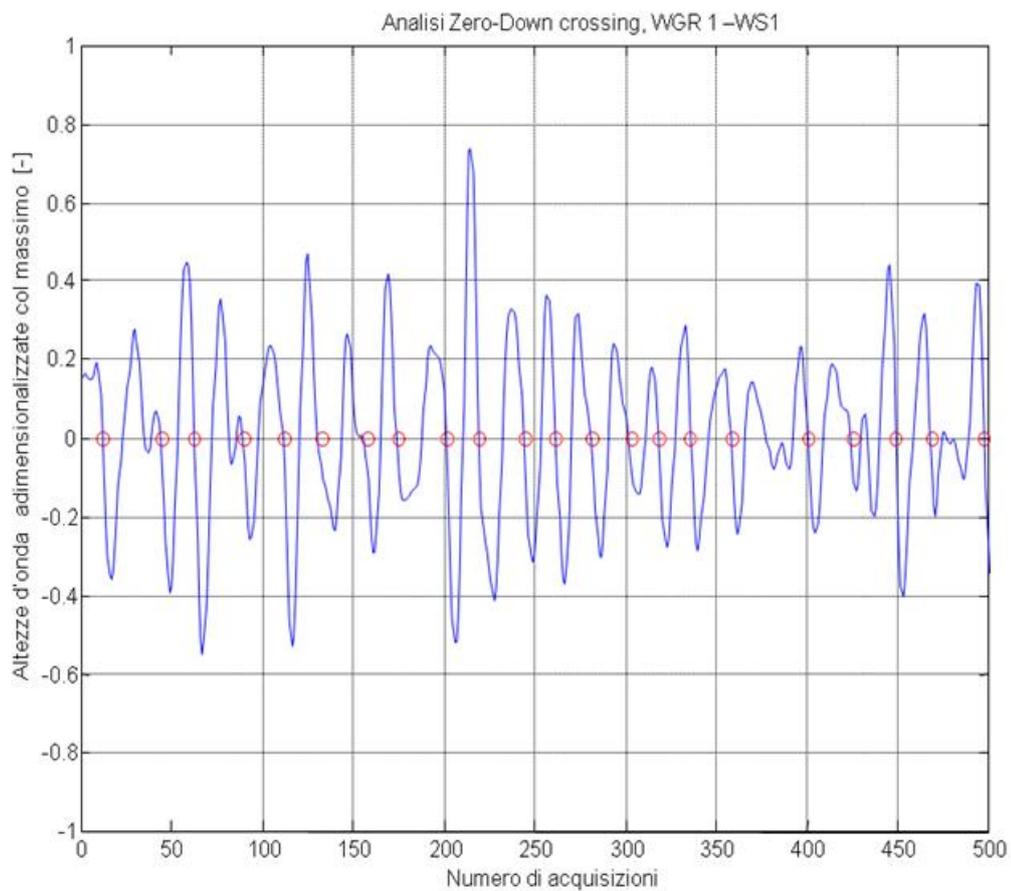


Figura 7.4: spezzone di segnale suddiviso in onde apparenti mediante l'analisi zero-down crossing.

In Figura 7.5 è possibile, invece, osservare i risultati dell'analisi, ovvero la distribuzione delle altezze d'onda e dei periodi d'onda di fronte alla struttura nel caso di stato ondoso 1. Le coppie di altezza e periodo più frequenti saranno quelle corrispondenti alla zona del grafico in cui la nuvola di punti si mostra particolarmente concentrata.

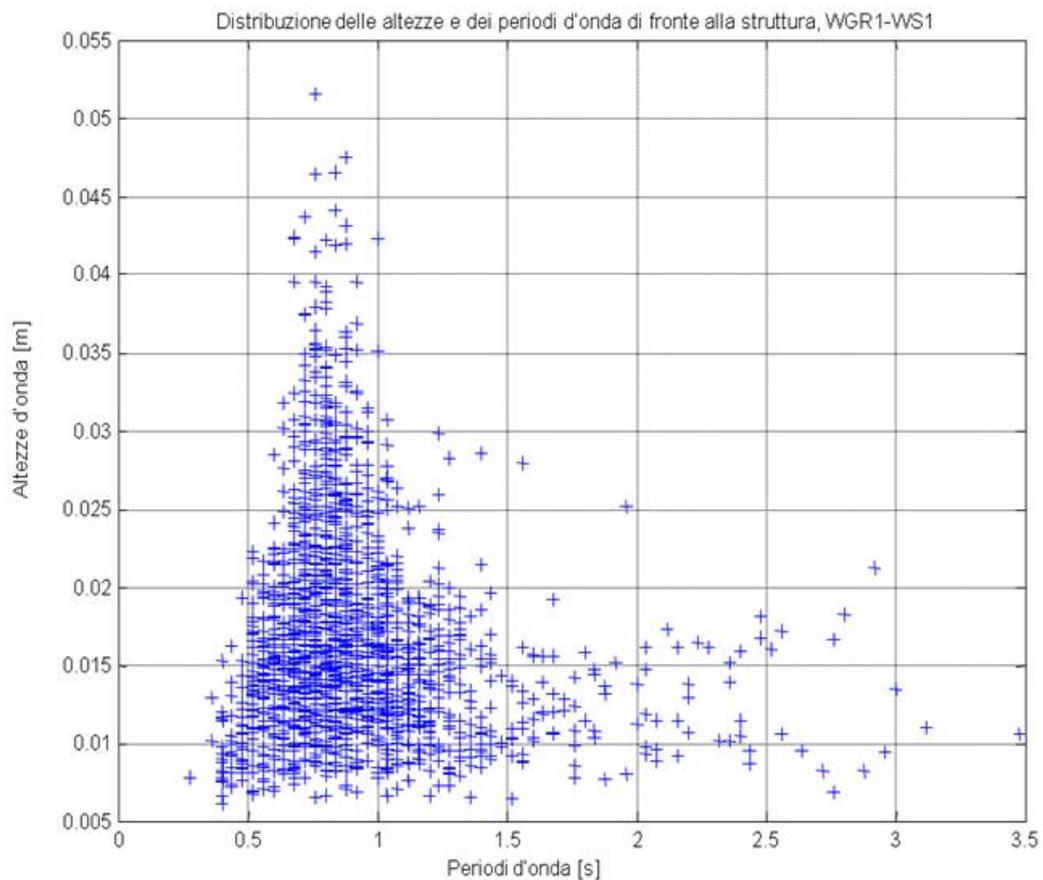


Figura 7.5: andamento delle altezze in funzione dei periodi d'onda.

7.2.2 Analisi zero-down crossing per le sonde di fianco al Leancon

Com'è stato studiato il campo d'onda di fronte al Leancon, così si è provveduto a studiare il campo d'onda di fianco al Leancon, o meglio lungo il suo braccio. Per fare

questo tipo di studio è stata eseguita un'analisi zero-down crossing, considerando contemporaneamente i segnali acquisiti da tutte e 4 le sonde WGF disposte in vasca lungo l'asse y, perpendicolarmente alle onde incidenti.

Per ciascuna delle 4 sonde si è eseguita un'analisi zero-down crossing, procedendo alla stessa maniera vista nel paragrafo precedente. Dall'analisi sono stati ricavati i periodi T_i e le altezze H_i per ciascuno dei 4 segnali acquisiti; quindi si è calcolata la media e la deviazione standard delle altezze e la media e la deviazione standard dei periodi, e, al fine di studiarne l'andamento lungo il braccio del Leancon, sono stati graficati in funzione della distanza delle sonde dall'asse del Leancon.

Le sonde WGF presentano le seguenti distanze dall'asse del Leancon:

$$y_{WGF1} = 0.3 \text{ m}$$

$$y_{WGF2} = 0.75 \text{ m}$$

$$y_{WGF3} = 1.95 \text{ m}$$

$$y_{WGF4} = 2.85 \text{ m}$$

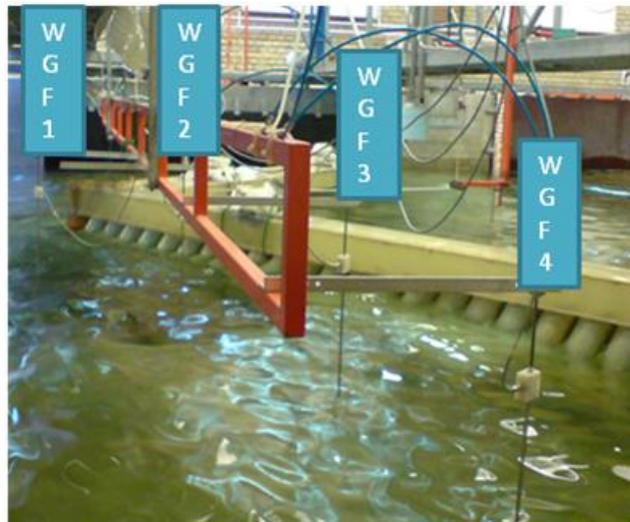


Figura 7.6: le sonde lungo il braccio del Leancon

Il grafico dei periodi medi in funzione della distanza dall'asse del Leancon è risultato di difficile interpretazione, mentre informazioni interessanti per lo studio del campo d'onda lungo il braccio del Leancon sono desumibili dal grafico in Figura 7.7, che esprime la distribuzione delle altezze d'onda medie in funzione della distanza dal braccio del Leancon, nel caso dello stato ondoso 1. L'altezza media è minima in corrispondenza della gauge 1, ovvero in corrispondenza della sonda più vicina alla punta, mentre è massima in corrispondenza della gauge 4, ovvero in corrispondenza

della sonda più lontana dall'asse del Leancon. Questo comportamento può essere spiegato da un fenomeno di diffrazione in corrispondenza della punta del dispositivo, fenomeno in grado di generare forte perdita di energia; nonostante il dispositivo rifletta fortemente le onde incidenti, in punta, il fenomeno della diffrazione sembra prevalere rispetto a quello della riflessione.

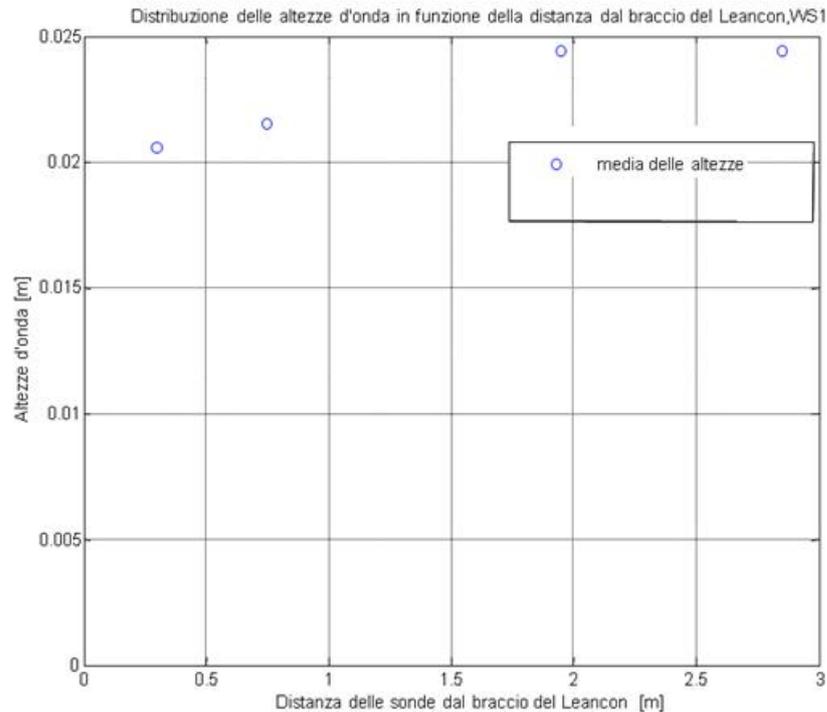


Figura 7.7: variazione delle altezze medie in funzione della distanza dall'asse del Leancon.

7.3 Studio della rapidità di risposta del sistema

Studiare i tempi di risposta del sistema, significa, nel caso specifico, individuare quale sia l'intervallo di tempo che intercorre tra il verificarsi di un picco di potenza oncosa e il presentarsi del picco corrispettivo di potenza prodotta dal dispositivo. Lo studio si è svolto nel seguente modo:

- E' stato ricostruito l'andamento nel tempo della potenza del dispositivo, dai valori di potenza misurata.

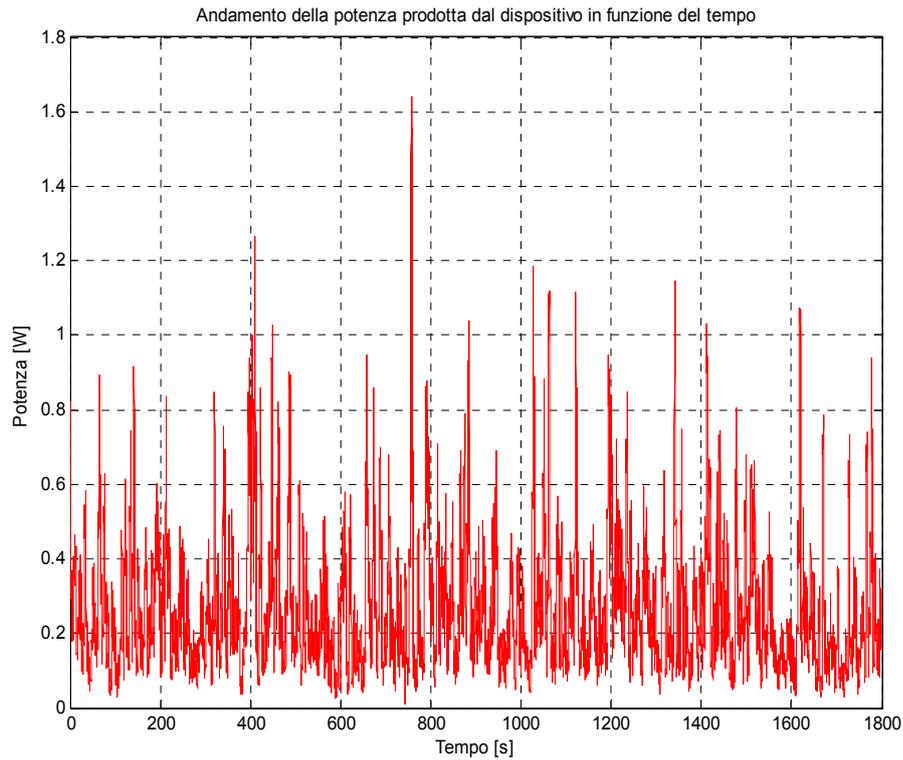


Figura 7.8: potenza prodotta dal dispositivo in funzione del tempo.

- Al fine di operare un confronto tra il segnale di potenza prodotta dal dispositivo ed il segnale di potenza ondosa, si è cercato di ricostruire l'andamento nel tempo della potenza d'onda, con riferimento alla sonda WGR1, impiegando la relazione 7.1, che esprime la potenza ondosa ad ogni istante di acquisizione.

$$P_w = \left(\frac{\rho g^2 16 \langle \eta^2 \rangle T_p}{64 * \pi} \right) \quad (7.1)$$

Con:

T_p : periodo di picco ottenuto dal valore medio dei periodi dell'analisi zero-down crossing eseguita sul segnale d'onda rilevato dalla sonda 1.

$$T_p = 1,24 T_{medio}$$

η : altezza d'onda misurata ad ogni istante di tempo dalla sonda 1.

- I due segnali di potenza sono stati posti in uno stesso grafico al fine di visualizzarne lo sfasamento nel tempo. Questo sfasamento nel tempo non fornisce un'indicazione reale sui tempi di risposta del sistema, poiché, come spiegato nella sezione del set-up di laboratorio, la sonda di livello 1, cui è associato il segnale di potenza d'onda, non è posta nel medesimo punto in cui si effettuano le misurazioni di potenza generata. Quindi, per ottenere informazioni relative ai tempi di risposta effettivi, risulta necessario eliminare questo disturbo legato a tale sfasamento spaziale, e quindi temporale tra i due segnali.

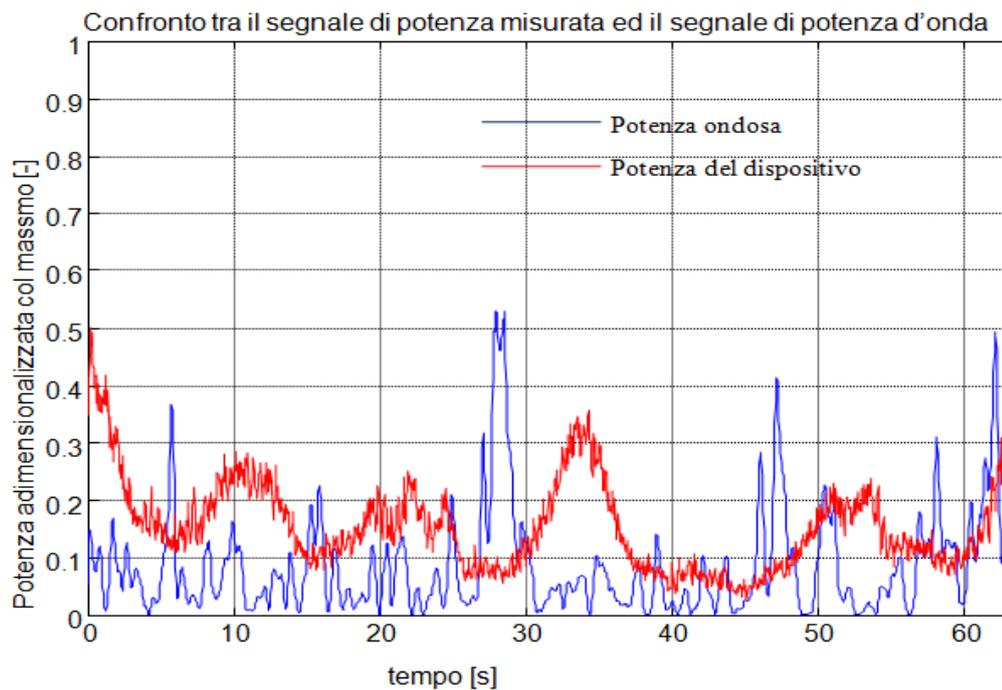


Figura 7.9: confronto tra il segnale di potenza misurata ed il segnale di potenza d'onda.

- Al fine di eliminare lo sfasamento temporale tra i due segnali, dovuto al fatto che il segnale di potenza ondosa viene misurato alcuni istanti prima di quello di potenza generata, si è operata una cross-correlazione tra i segnali stessi. La cross-correlazione rappresenta la misura di similitudine di due segnali come funzione di uno spostamento temporale applicato ad uno di essi e permette di rifasare due segnali, ovvero di rialinearli nel tempo.

- In Figura 7.11 è riportato il confronto tra l'andamento dei due segnali nel tempo; lo sfasamento temporale è di alcuni secondi, e mi rappresenta il tempo di risposta del dispositivo.

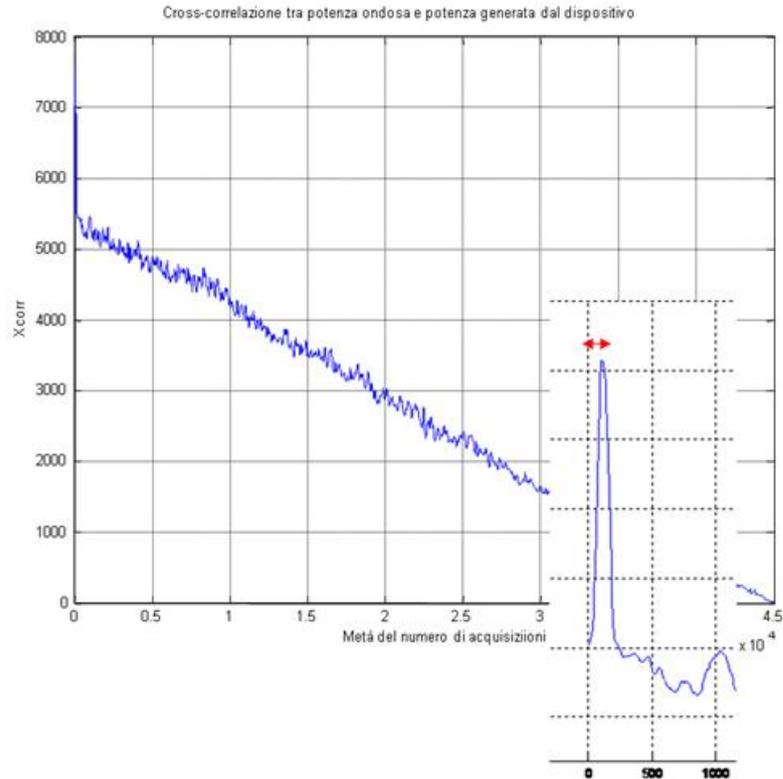


Figura 7.10: Cross-correlazione tra la potenza ondosa e la potenza generata dal dispositivo.

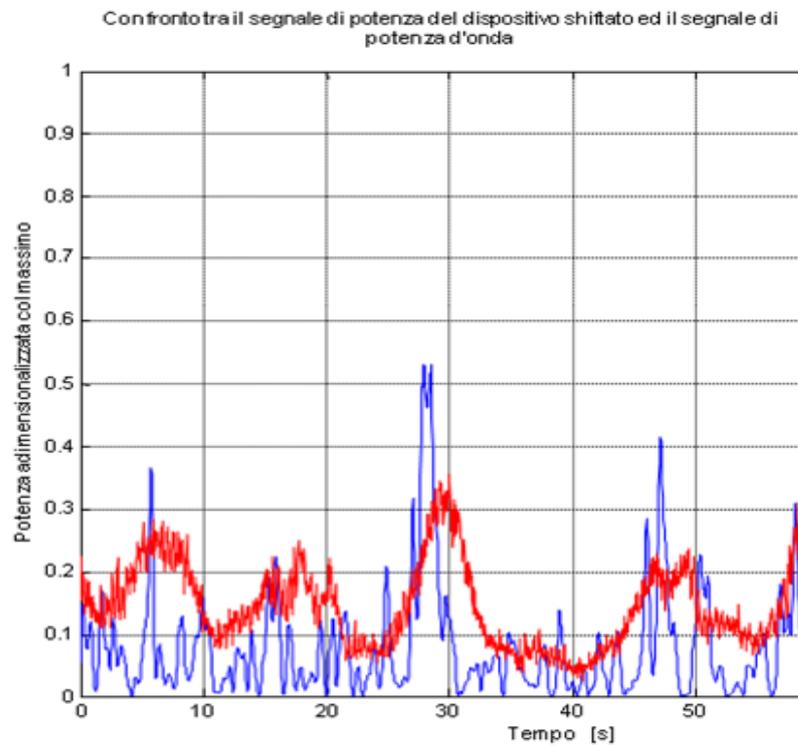


Figura 7.11: confronto tra il segnale shiftato di potenza del dispositivo ed il segnale di potenza d'onda.

Capitolo 8

Analisi dell'efficienza del Leancon

8.1 Introduzione

Nel presente capitolo viene trattato il tema fondamentale della tesi, ovvero “l'analisi dell'efficienza del Leancon”. Tale analisi prevede due studi correlati, condotti in successione.

- I. Studio statistico sui dati di potenza del dispositivo in scala 1:40.
- II. Valutazione dell'energia prodotta dal dispositivo nel caso di un'ipotetica installazione nel porto di Cagliari.

La seconda parte dell'analisi si basa sui risultati ottenuti dallo studio statistico, che permettono, dato un particolare stato di mare, caratterizzato da una certa altezza d'onda significativa H_s , e da un certo periodo di picco T_p , di risalire al valore medio di potenza estraibile dal dispositivo in dette condizioni ondose.

8.2 Studio statistico sui dati di potenza del dispositivo in scala 1:40

Lo studio statistico condotto sui dati di potenza del modello in scala 1:40, come già affermato, costituisce la prima parte di un'analisi più ampia e si articola nei seguenti passi.

➤ Il primo passo fondamentale è stato quello di determinare la distribuzione di probabilità della potenza misurata e prodotta dal dispositivo; per *distribuzione di probabilità* s'intende un modello matematico che collega i valori di una variabile (in questo caso la potenza misurata) alle probabilità che tali valori possano essere osservati.

Dalle prove in laboratorio sono stati ottenuti, per ciascuno dei 5 stati d'onda, i valori di potenza generata dal dispositivo nel corso dell'intervallo di acquisizione. Con l'ausilio di MATLAB è stato possibile ricostruire l'andamento della distribuzione di probabilità della potenza misurata, ovvero generare una curva in grado di esprimere

la probabilità di accadimento relativa a ciascun valore di potenza misurata. Il calcolo della probabilità di accadimento si è svolto nel seguente modo:

- I valori di potenza misurata sono stati ordinati secondo una scala crescente
- A ciascun valore di potenza misurata è stato associato un indice i compreso tra 1 e n (numero dei valori di potenza acquisiti).
- La probabilità di accadimento relativa a ciascun valore di potenza è stata determinata applicando la seguente formula:

con :

In Figura 8.1 sono riportate le curve di distribuzione di probabilità relative ai 5 stati ondosi. Per ciascuno stato d'onda, la probabilità di accadimento risulta massima per i valori di potenza più bassi, mentre diminuisce all'aumentare della potenza misurata; inoltre la potenza relativa ad una data probabilità di accadimento aumenta al crescere dello stato ondoso.

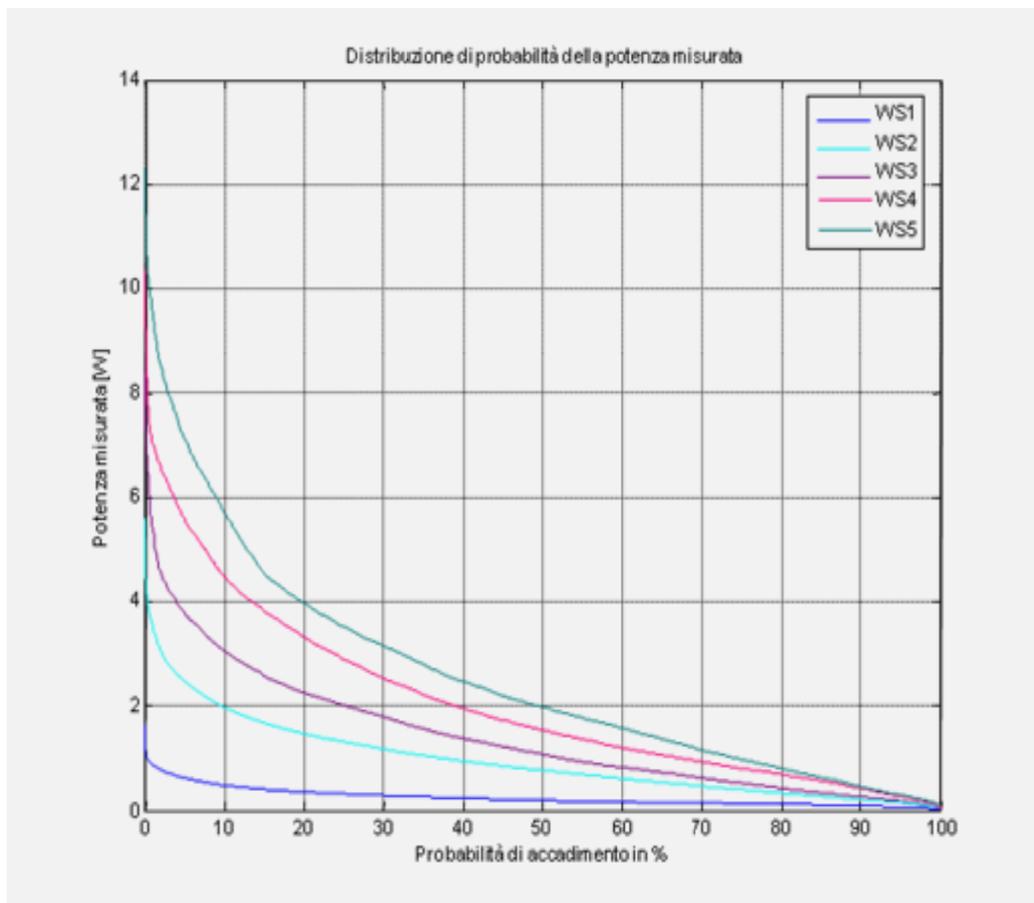


Figura 8.1: distribuzioni di probabilità delle potenze misurate.

➤ Una volta ricostruito, per ciascuno stato d'onda, l'andamento della distribuzione di probabilità, si è cercata una distribuzione probabilistica nota, in grado di approssimare quella reale della potenza misurata. Questa procedura è necessaria al fine di ricavare dei parametri capaci di sintetizzare le caratteristiche della distribuzione di probabilità, caratteristiche che altrimenti risulterebbero ignote. Sempre con l'ausilio del programma MATLAB, è stata individuata nella distribuzione lognormale, una distribuzione capace di ben approssimare quella reale. In Figura 8.2 è possibile valutare con quale accuratezza l'inversa della distribuzione lognormale si sovrapponga alla distribuzione reale della potenza misurata, nei 5 stati ondosi. Nonostante l'approssimazione sia abbastanza buona per tutti e 5 gli stati ondosi, la sovrapposizione tra le due curve risulta massima per lo stato ondoso 1, e diventa a mano a mano più scadente per gli stati d'onda successivi.

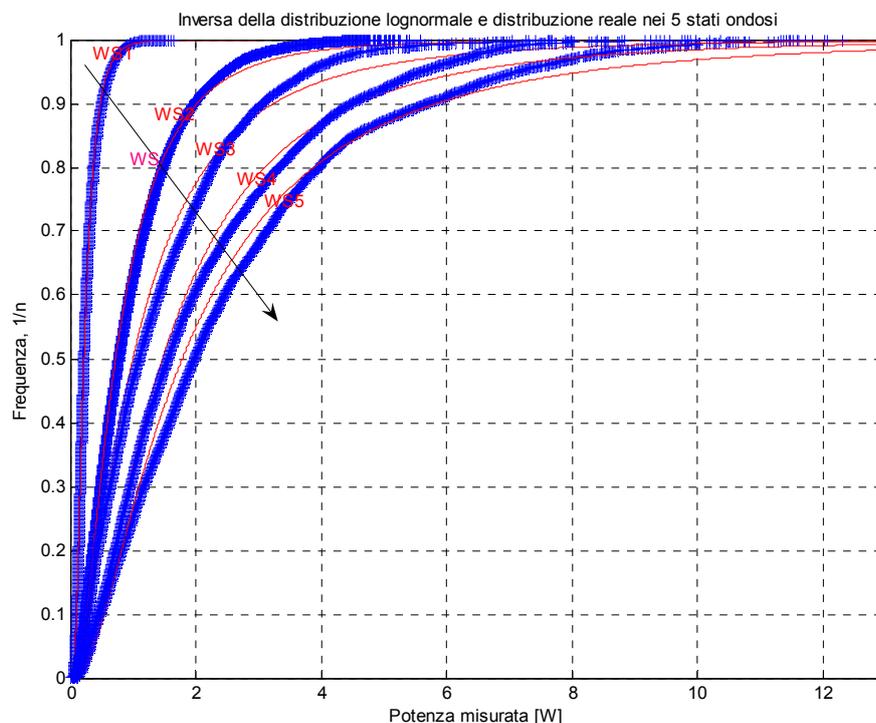


Figura 8.2: approssimazione della distribuzione di potenza misurata.

➤ Sebbene, quindi, si presenti un peggioramento dell'approssimazione al crescere dello stato ondoso, tale distribuzione è stata ritenuta comunque sufficientemente vicina a quella originaria. Pertanto, sono stati ricavati, per ciascuno stato ondoso i parametri caratteristici della distribuzione lognormale, λ e γ .

WS	λ	γ
1	-1.52	0.62
2	-0.32	0.80
3	0.00	0.92
4	0.39	0.89
5	0.58	0.93

Tabella 8.1: Valori di λ e γ .

Tali parametri sono legati alla media m ed alla varianza v della distribuzione lognormale dalle seguenti relazioni:

$$m = e^{(\lambda + \frac{\gamma^2}{2})} \quad (8.2)$$

$$v = e^{(2\lambda + 2\gamma^2)} - e^{(2\lambda + \gamma^2)} \quad (8.3)$$

Pertanto, si è risaliti alla media e alla varianza, quindi alla deviazione standard della distribuzione lognormale relativa ai 5 stati ondosi, col comando di MATLAB:

$$[m,v] = \text{lognstat}(\lambda,\gamma)$$

WS	m	dev.standard
1	0.26	0.18
2	1.00	0.95
3	1.53	1.76
4	2.18	2.39
5	2.74	3.19

Tabella 8.2: valori della media e della deviazione standard.

Confrontando, per ciascuno stato ondoso, la media della distribuzione lognormale e la media di potenza misurata, si osserva come i due valori siano pressochè uguali per stati ondosi bassi e come, invece, si discostino sempre più all'aumentare dello

stato ondoso; tale comportamento è in accordo con quanto emerge dai grafici di Figura 8.2. e dimostra come questo studio statistico risulti particolarmente valido per i primi stati ondosi.

WS	media Potenza misurata	m
1	0.26	0.26
2	0.97	1.00
3	1.44	1.53
4	2.07	2.18
5	2.57	2.74

Tabella 8.3: confronto tra potenza media misurata e approssimata.

Le medie e le deviazioni standard così ottenute sono state adimensionalizzate; risulta infatti più significativo lavorare su grandezze adimensionali, che non presentano problemi di scala. In particolare l'adimensionalizzazione delle grandezze in gioco si è compiuta rapportando i valori di media e di deviazione standard di ciascuno stato ondoso alle potenze d'onda medie corrispettive.

La potenza d'onda media, relativa ad un particolare stato ondoso, è fornita dalla relazione:

$$P_w = \left(\frac{\rho g^2 16 H_s^2 \left(\frac{T_p}{1.15} \right)}{64 * \pi} \right) \quad (8.4)$$

Al fine di ottenere la potenza d'onda complessiva applicata all'intero dispositivo, è stato necessario moltiplicare il valore ottenuto per la larghezza del modello in scala, ovvero per 6 m.

WS	m adimensionale	dev. standard adimensionale
1	0.206	0.141
2	0.124	0.117
3	0.075	0.087
4	0.050	0.055
5	0.029	0.034

Tabella 8.4: valori di media adimensionale e deviazione standard adimensionale.

➤ Determinati i parametri che descrivono la distribuzione di probabilità nei 5 stati d'onda testati, si è cercato di individuare un legame tra detti parametri e le grandezze

caratteristiche degli stati ondosi, ovvero H_s e T_p , col fine ultimo di ottenere una legge che mi permetta di associare a qualsiasi stato d'onda una distribuzione di probabilità.

Sono stati individuati 2 parametri, necessariamente adimensionali, dipendenti da H_s e T_p e pertanto rappresentativi dell'intensità dello stato di mare. Il primo parametro considerato è la ripidità d'onda, funzione sia di H_s sia di T_p , e dato dal rapporto tra l'altezza significativa e la lunghezza d'onda.

$$r = \frac{H_s}{L} \quad (8.5)$$

Dove:

$$L = 1,56 \times \left(\frac{T_p}{1,15} \right)^2$$

Il secondo parametro preso in considerazione è invece funzione esclusivamente di H_s ed è dato dal rapporto tra l'altezza significativa e il draft (sommergenza del dispositivo in acqua).

$$h = \frac{H_s}{d} \quad (8.6)$$

Con:

d =draft.

Pertanto, si è proceduto graficando i valori di media e deviazione standard in funzione della ripidità e dell'altezza adimensionale, e si è andati ad interpolare ciascun insieme finito di punti con delle linee, al fine di trovare delle funzioni $f(x)$ in grado di rappresentare al meglio un legame tra media-deviazione standard e ripidità-altezza d'onda. Il grado di adattamento della funzione interpolante ai punti graficati è espresso dall'indice di bontà di adattamento R^2 , numero puro compreso tra 0 e 1, che se assume valori elevati, indica un buon adattamento, mentre se assume valori prossimi a zero, indica una scarsa bontà di adattamento.

In Figura 8.3 sono riportati i grafici relativi alla deviazione standard: i punti che esprimono la deviazione standard in funzione dell'altezza d'onda si dispongono

lungo una retta con un'altissima precisione, mentre i punti che esprimono la deviazione standard al variare della ripidità d'onda risultano mal interpolati.

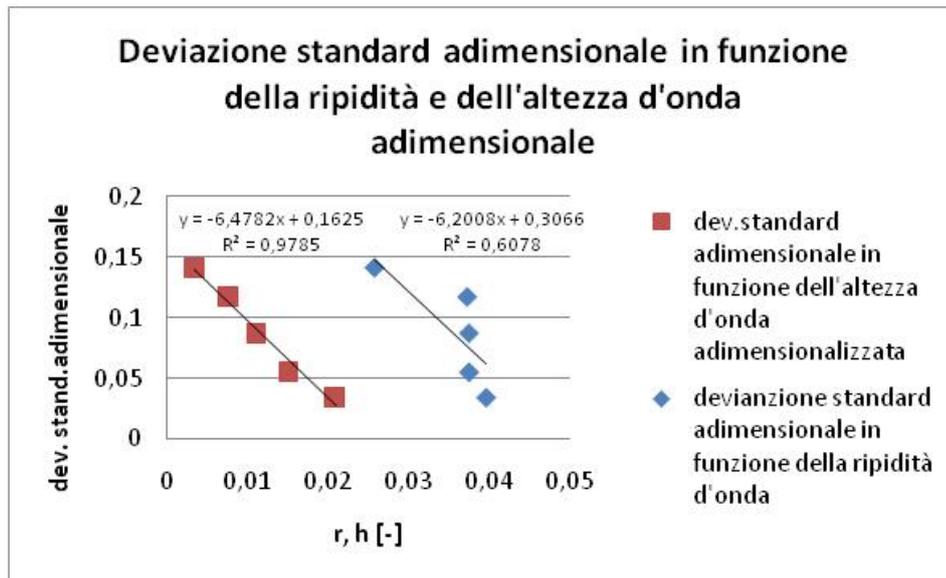


Figura 8.3: deviazione standard in funzione della ripidità e dell'altezza d'onda.

In Figura 8.4 sono riportati i grafici relativi alla media: i punti che esprimono la media in funzione dell'altezza d'onda sono molto bene interpolati da una linea logaritmica e i punti che esprimono la media al variare della ripidità d'onda risultano anch'essi ben interpolati, ma in questo caso da una retta.

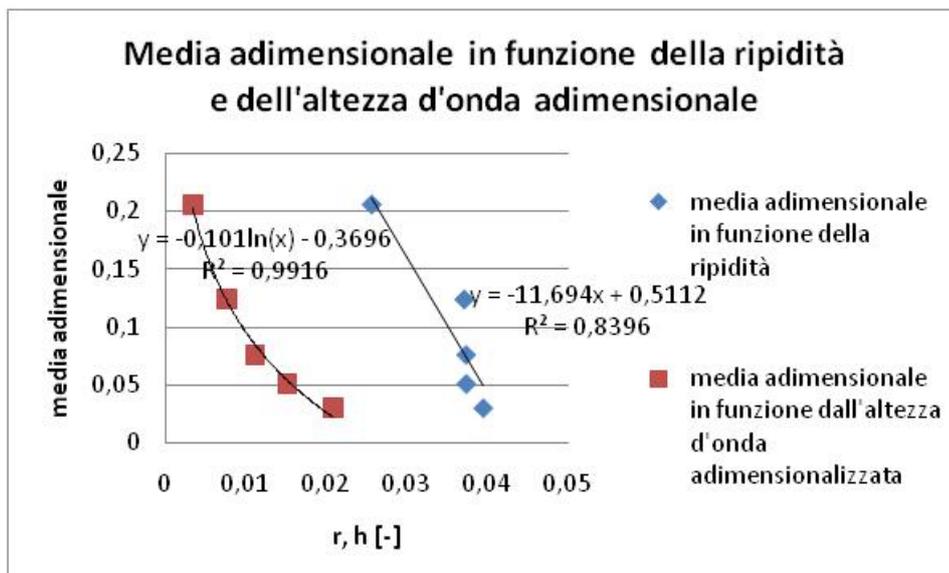


Figura 8.4: media adimensionale in funzione della ripidità e dell'altezza d'onda.

Se ora si va a confrontare la Figura 8.3 e la Figura 8.4, si osserva che la deviazione standard non è facilmente relazionabile alla ripidità d'onda, mentre al contrario i

valori della media in funzione della ripidità sono ben interpolati; ne consegue che per disporre di un legame tra deviazione standard ed uno dei due parametri adimensionali delle ascisse, si debba considerare l'equazione che lega la deviazione standard all'altezza d'onda adimensionale.

In Figura 8.5 sono riportati i grafici sui quali è ricaduta la scelta.

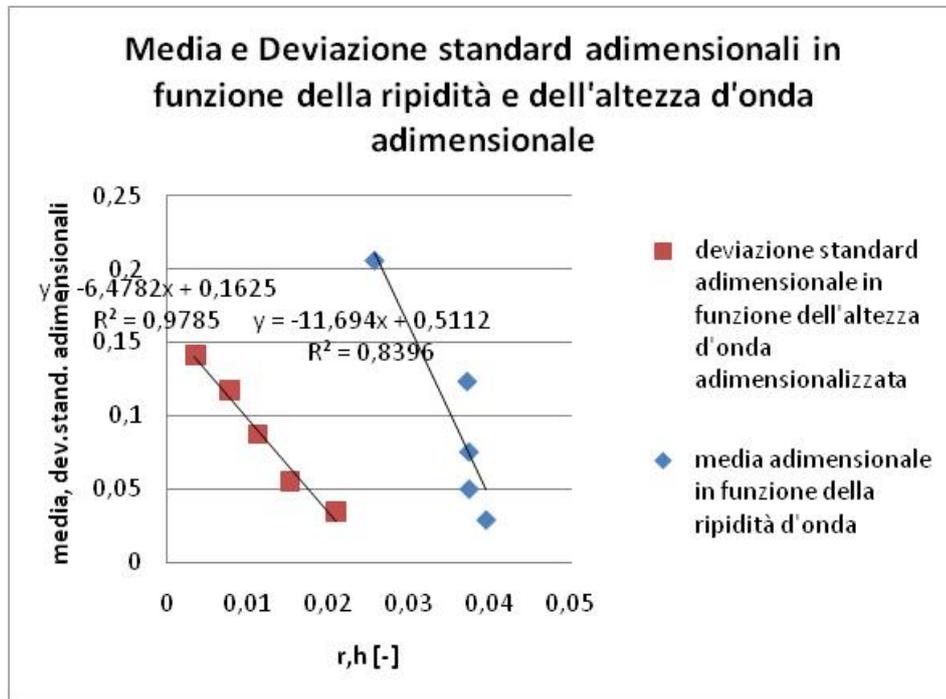


Figura 8.5: media e deviazione standard in funzione della ripidità e dell'altezza d'onda.

➤ Nonostante la bontà dei risultati ottenuti, si è pensato di effettuare il medesimo studio anche con i parametri λ e γ adimensionali, ricavati direttamente dai valori di media e deviazione standard adimensionali. Il fine ultimo di questo nuovo studio è quello di valutare la possibilità che λ e γ possano relazionarsi ad H_s e T_p meglio rispetto alla media ed alla deviazione standard.

Pertanto sono stati calcolati i valori di λ e γ da quelli di media e varianza, invertendo le formule (8.2) e (8.3).

WS	λ adim.	γ adim.
1	-1.7709	0.6196
2	-2.4096	0.7996
3	-3.0073	0.9205
4	-3.3869	0.8867
5	-3.9533	0.9124

Tabella 8.5: λ adimensionale e γ adimensionale

Analogamente al caso precedente, si è andati a graficare i valori di λ e γ in funzione delle ripidità d'onda e dell'altezza d'onda adimensionale. Dai 4 grafici ottenuti, sono stati scelti i 2 che meglio descrivono il legame esistente tra λ - γ e la ripidità d'onda-altezza d'onda.

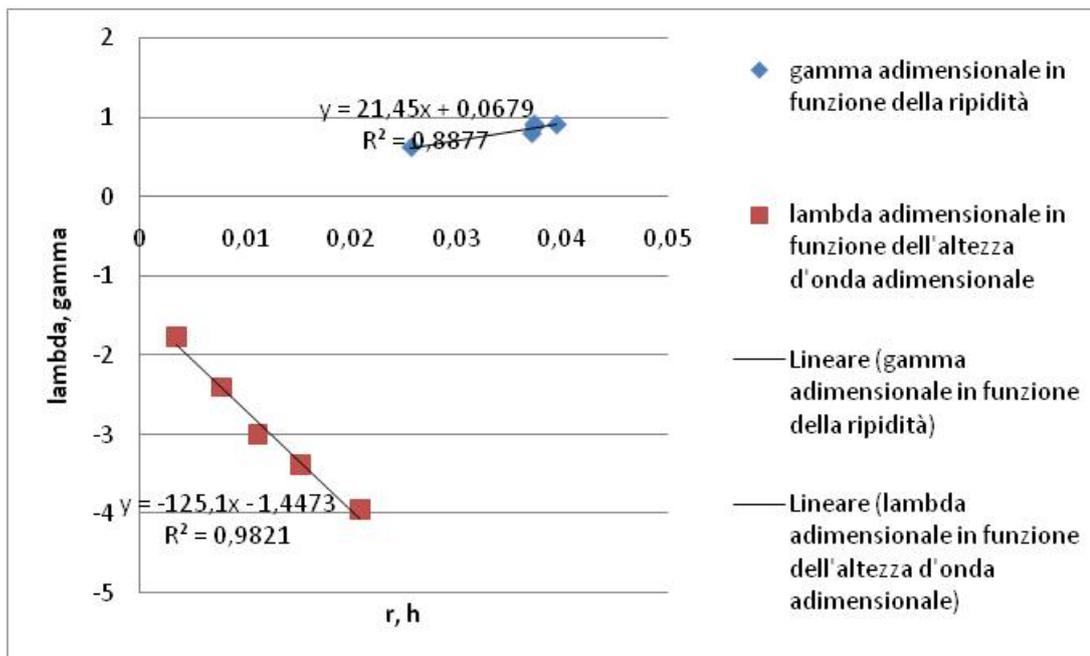


Figura 8.6: λ e γ adimensionali in funzione della ripidità e dell'altezza d'onda.

- Come ultimo passo si è andati a confrontare i grafici relativi alla media e alla deviazione standard (Figura 8.5) con i grafici relativi a λ e γ (Figura 8.6): l'indice di bontà di adattamento R^2 assume valori maggiori nel caso di γ adimensionale in

funzione della ripidità e di λ adimensionale in funzione dell'altezza d'onda adimensionale.

Alla luce delle osservazioni fatte, le due funzioni che meglio esprimono il legame tra la distribuzione probabilistica approssimata e le due grandezze caratteristiche di uno stato ondoso sono:

$$\lambda_{ad} = -125,1h - 1,4473$$

$$\gamma_{ad} = 21,45r + 0,0679$$

8.3 Installazione nel porto di Cagliari

Lo studio statistico condotto sui dati di potenza del dispositivo, rilevati sperimentalmente mediante prove in laboratorio, ha permesso di determinare due equazioni, una che esprime il legame che intercorre tra il parametro λ della distribuzione probabilistica approssimata e la ripidità d'onda, ed una che invece esprime il legame tra γ , sempre della distribuzione probabilistica approssimata e l'altezza d'onda adimensionalizzata con il draft del dispositivo. Pertanto, dato un particolare stato di mare, caratterizzato da una certa altezza d'onda significativa H_s , e da un certo periodo di picco T_p , si è in grado di risalire, tramite λ e γ , alla media ed alla deviazione standard della distribuzione probabilistica di potenza, e quindi al valore medio di potenza estraibile dal dispositivo in dette condizioni ondose.

In particolare, ci si è serviti dei risultati ottenuti da tale studio statistico, per simulare una procedura di installazione del Leancon in Italia.

➤ Il primo passo è consistito nell'individuare l'area marina caratterizzata da stati ondosi idonei all'installazione del dispositivo. Il processo che ha portato alla scelta di Cagliari, come località designata allo studio dell'installazione, è passato attraverso la lettura dei dati relativi alla distribuzione dell'energia ondosa in Italia, e l'analisi del clima meteo-marino, e della sua statistica. Sotto è illustrata una mappa della

distribuzione della potenza d'onda (P_{onda}) annuale media, espressa in kW/m, in Europa, con a fianco un ingrandimento relativo al territorio della Sardegna.

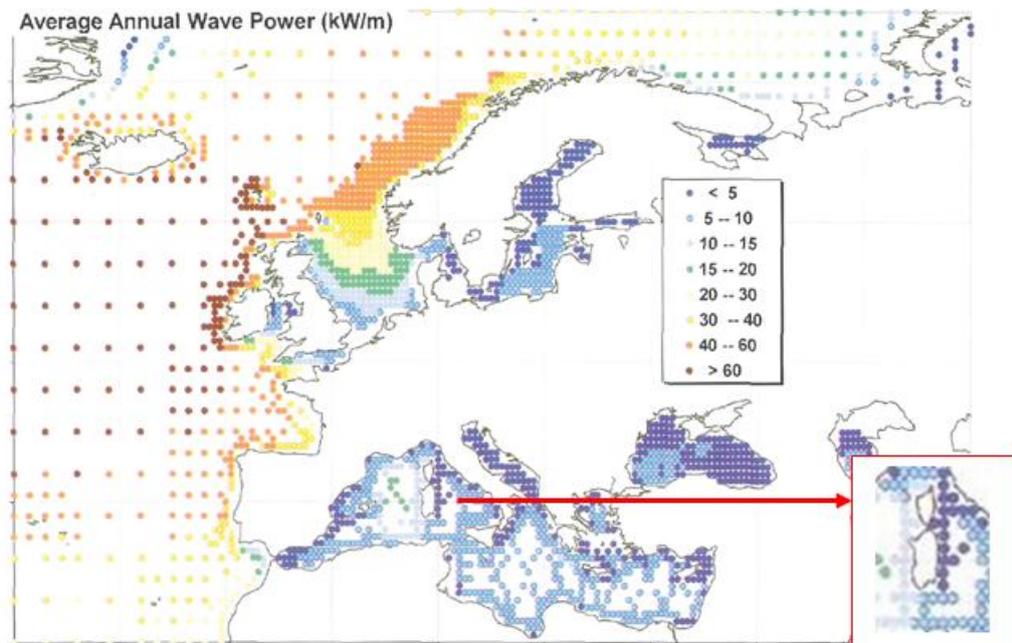


Figura 8.7: mappa della distribuzione della potenza d'onda (P_{onda}) annuale media, espressa in kW/m, in Europa

➤ Una volta scelta, come località piu' idonea per l'installazione, l'area marina di Cagliari, è stato studiato il clima meteo-marino della località. La fonte dei dati del clima meteo-marino di Cagliari è "MEDATLAS". MEDATLAS è un progetto supportato dall'Istituto di Scienze Marine - Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISMAR-CNR) di Venezia, finalizzato a produrre un atlante elettronico del vento e delle onde nel Mediterraneo, che fornisce statistiche complete del vento e delle onde su tutto il Mediterraneo. Poiché nessuna sorgente è in grado di fornire, da sola, tutti i dati necessari per redigere l'atlante, il progetto utilizza in modo sinergico i dati di boe, satelliti e modelli numerici. Tutti i risultati sono forniti al largo della costa. Tra i dati resi disponibili a largo della costa di Cagliari dal "Progetto MEDATLAS", sono stati scelti quelli corrispondenti alle coordinate geografiche 38 Nord e 10 Est. I venti che soffiano su Cagliari sono il maestrale (prevalente e dominante) e lo scirocco.



Figura 8.8: localizzazione della boa.

➤ Le prove in laboratorio sul modello in scala 1:40 sono state effettuate con profondità del fondale pari a 0,73m, pertanto a piena scala tale profondità deve risultare circa pari a 30 m. I dati scelti nel passo precedente relativi alle condizioni a largo, non sono stati trasformati, ma sono stati mantenuti invariati. Infatti si suppone che le condizioni ondose di un punto a distanza infinita e quelle di un punto con profondità marine pari a 30 m, rimangono pressochè invariate, poiché non si verifica il frangimento e si presenta un fenomeno di shoaling ridotto.

Tp	Hs								
	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7,5	7,5 - 9	9 - 10
1.29	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.18	75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.41	193.00	34.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.56	101.00	96.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.72	89.00	89.00	39.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.13	49.00	66.00	42.00	17.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.84	7.00	28.00	20.00	18.00	11.00	2.00	0.00	0.00	0.00
11.91	0.00	2.00	3.00	4.00	3.00	2.00	2.00	0.00	0.00
15.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella 8.6: Stati di mare

In Tabella 8.5 è espresso il numero di osservazioni relative ad un certo periodo e ad un certo intervallo di altezza d'onda. Le osservazioni complessivamente sono pari a 999, pertanto se all'incrocio tra la casella del periodo e la casella dell'altezza vi è, ad esempio, il valore 3, significa che lo stato ondoso in questione è stato osservato 3 volte su 999 osservazioni.

Per ciascun intervallo in cui sono state raggruppate le altezze d'onda significative, è stata effettuata una media pesata dei periodi di picco, utilizzando come peso la probabilità di accadimento di ogni stato ondoso. Pertanto, ad ogni valore di altezza d'onda corrisponde un unico valore del periodo di picco, che è il risultato della media pesata con le probabilità di accadimento, ed una probabilità di accadimento, ed una potenza d'onda, opportunamente calcolate. In questo modo diventa possibile lavorare con un numero di dati più agevole.

In Tabella 8.6 sono stati riportati i vari stati ondosi riscontrati a Cagliari, con associate le probabilità di accadimento, ottenute dividendo il numero di eventi per le osservazioni complessive. Come valori di altezze significative sono stati presi i valori medi per ciascun intervallo.

Hs	Tp	N°eventi	Probabilità di accadimento
0.5	1.29	3	0.003
0.5	3.18	75	0.075
0.5	4.41	193	0.193
0.5	5.56	101	0.101
0.5	6.72	89	0.089
0.5	8.13	49	0.049
0.5	9.84	7	0.007
1.5	4.41	34	0.034
1.5	5.56	96	0.096
1.5	6.72	89	0.089
1.5	8.13	66	0.066
1.5	9.84	28	0.028
1.5	11.91	2	0.002
2.5	5.56	2	0.002
2.5	6.72	39	0.039

2.5	8.13	42	0.042
2.5	9.84	20	0.020
2.5	11.91	3	0.003
3.5	6.72	1	0.001
3.5	8.13	17	0.017
3.5	9.84	18	0.018
3.5	11.91	4	0.004
4.5	8.13	1	0.001
4.5	9.84	11	0.011
4.5	11.91	3	0.003
5.5	9.84	2	0.002
5.5	11.91	2	0.002
6.5	11.91	2	0.002

Tabella 8.7: Stati di mare

Poiché risulta difficile lavorare su un numero così elevato di stati ondosi, sono stati ricavati solo 6 stati ondosi, operando per ciascuna altezza d'onda la media pesata dei periodi, sulla base delle probabilità di accadimento. Gli stati d'onda presi in considerazione per l'installazione a Cagliari sono riportati in Tabella 8.7.

WS	Hs	Tpesato	Probabilità
1	0.50	5.26	0.518
2	1.50	6.72	0.315
3	2.50	7.99	0.106
4	3.50	9.24	0.040
5	4.50	10.14	0.015
6	5.50	10.88	0.004
7	6.50	11.91	0.002

Tabella 8.8: stati di mare considerati.

➤ Per ciascuno stato d'onda si è andati a calcolare l'altezza d'onda adimensionalizzata con il draft e la ripidità dell'onda, secondo le formule (8.5) e (8.7). Come valore di draft è stato preso 2,4 m, valore ottenuto andando a scalare il valore di draft di 0,07 m adottato nelle prove di laboratorio eseguite sul modello in scala 1:40.

WS	Hs/Draft	Ripidità d'onda
1	0.002	0.0153
2	0.005	0.0282
3	0.009	0.0332
4	0.013	0.0347
5	0.016	0.0371
6	0.020	0.0394
7	0.023	0.0388

Tabella 8.9: altezza d'onda e ripidità d'onda a Cagliari.

Quindi, mediante l'impiego delle funzioni (8.8) e (8.9), ricavate nello studio precedente, si è potuto risalire ai valori di λ e γ adimensionali, quindi applicando le formule (8.2) e (8.3) alla media e deviazione standard adimensionale.

WS	m_ad	d.st_ad
1	0.2035	0.084
2	0.1508	0.114
3	0.1043	0.095
4	0.0685	0.066
5	0.0457	0.048
6	0.0306	0.035
7	0.0193	0.022

Tabella 8.10: m_ad e d.st_ad

➤ Poiché il valore di media adimensionale, relativo a ciascuno stato ondoso, rappresenta il rapporto tra la media della potenza estraibile dal dispositivo e la media della potenza ondosa, andando a moltiplicare il valore di media adimensionale per la potenza ondosa dello stato ondoso, si ottiene la potenza media estraibile dal dispositivo in quello stato ondoso. La potenza d'onda media è stata calcolata mediante la solita formula (8.4), moltiplicando però in questo caso, la potenza

ottenuta, espressa in W/m, non più per 6 m, bensì per 240 m, larghezza del dispositivo a piena scala.

WS	PTO media[kW]	Dev stand. [kW]
1	26.78	11.09
2	228.25	172.58
3	521.48	476.95
4	776.27	751.70
5	939.26	985.67
6	1007.59	1140.65
7	972.08	1126.24

Tabella 8.11: media e deviazione standard della potenza a Cagliari

➤ Quindi si è andati a graficare i valori di potenza così ottenuti, in funzione degli stati d'onda di Cagliari. Dal grafico di Figura 8.8 si può osservare che la potenza del dispositivo aumenta dallo stato ondoso 1 allo stato ondoso 6, in corrispondenza del quale raggiunge il massimo, per poi diminuire nuovamente dallo stato 6 allo stato 7.

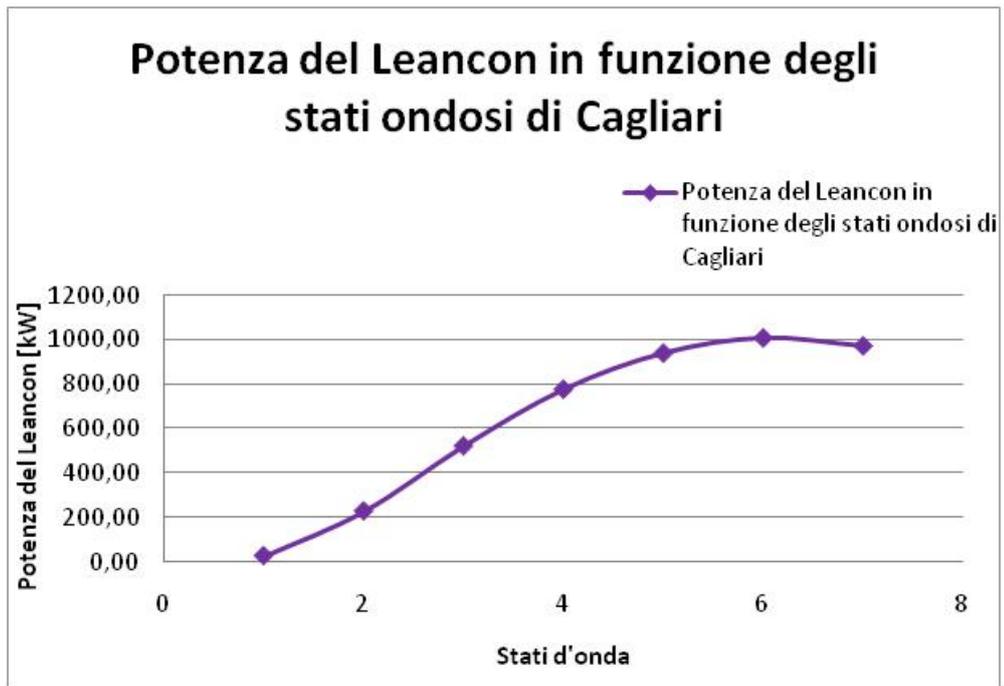


Figura 8.9: potenza del Leancon in funzione degli stati ondosi di Cagliari

➤ Dopo aver studiato l'andamento della potenza al variare degli stati ondosi, è stata studiata l'efficienza del Leancon, dove per efficienza, in questa sede, si intende la potenza prodotta dal dispositivo rapportata a quella disponibile, ovvero a quella delle onde del mare. Pertanto per ogni stato ondoso si è calcolata l'efficienza rapportando la potenza prodotta dal dispositivo a quella delle onde.

WS	Efficienza
1	0.2035
2	0.1508
3	0.1043
4	0.0685
5	0.0457
6	0.0306
7	0.0193

Tabella 8.12: efficienze.

Quindi, come nel caso della potenza, anche in questo caso si è andati a graficare i valori di efficienza ottenuti, in funzione degli stati d'onda presenti a Cagliari. Dal grafico di Figura 8.10 si può osservare che l'efficienza risulta massima per lo stato ondoso 1 e che diminuisce fino ad assumere il valore minimo in corrispondenza dello stato ondoso 7.

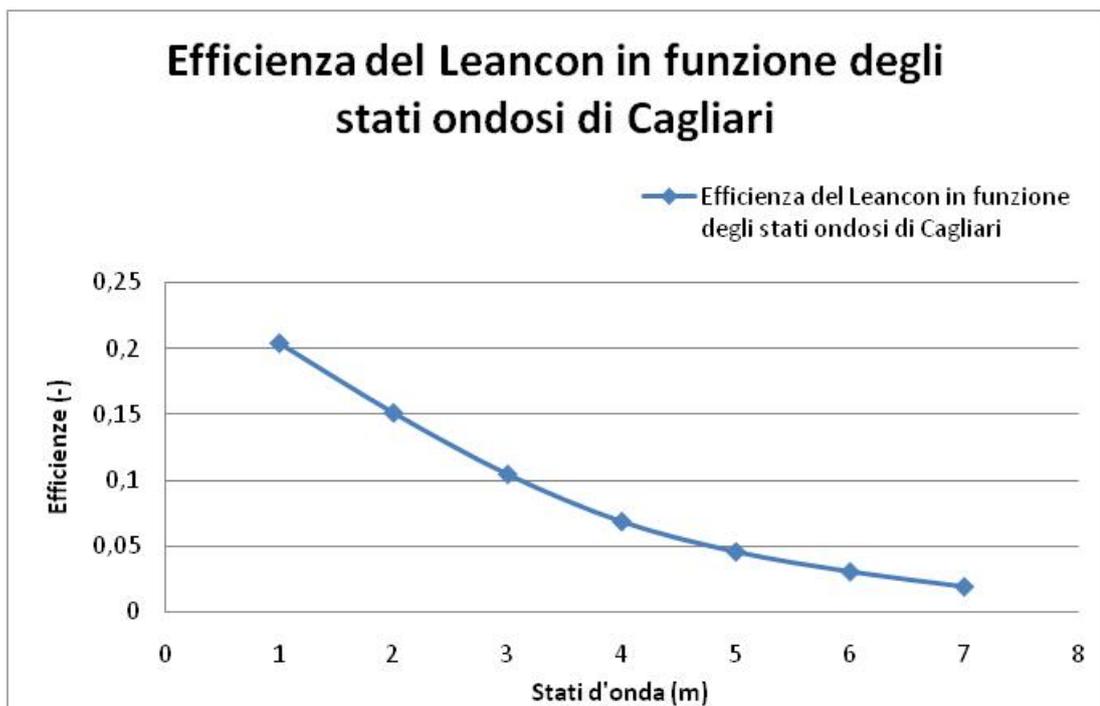


Figura 8.10: efficienza in funzione degli stati ondosi di Cagliari.

➤ Ciascuno stato ondoso presenta una certa probabilità di accadimento, di cui bisogna tenere assolutamente conto. Le potenze medie del dispositivo nei diversi stati d'onda non presentano uguale probabilità di accadimento, poiché sono legate alle probabilità di accadimento nel mare di Cagliari dei singoli stati d'onda. Pertanto, in quest'ultima parte dello studio, si è andati a calcolare l'energia media giornaliera, quindi l'energia media annuale prodotta dal dispositivo, andando a considerare le probabilità associate a ciascun stato di mare.

WS	Probabilità	Probabilità espressa in ore giornaliere [h]
1	0.518	12.42
2	0.315	7.57
3	0.106	2.55
4	0.040	0.96
5	0.015	0.36
6	0.004	0.10
7	0.002	0.05

Tabella 8.13: probabilità di accadimento degli stati ondosi.

Calcolata la probabilità, espressa in ore giornaliere, che si verifichi un dato stato ondoso nell'arco di 24 ore, è stato possibile ricavare l'energia media del dispositivo in un giorno, quindi in un anno. Infatti il Watt esprime l'energia prodotta in 1 ora, e moltiplicato per un certo numero di ore fornisce l'energia espressa in Wh.

WS	PTO media [kW]	Energia media dispositivo in un giorno[kWh]	Energia media dispositivo in un anno[MWh]
1	26.78	332.61	121.40
2	228.25	1727.21	630.43
3	521.48	1327.91	484.69
4	776.27	745.22	272.00
5	939.26	338.13	123.42
6	1007.59	96.73	35.31
7	972.08	46.66	17.03

Tabella 8.14: tabella riassuntiva, con energia media dispositivo in un anno.

I valori di produzione energetica media annua sono stati quindi relazionati agli stati ondosi corrispettivi. Nel grafico a torta di Figura 8.10 è riportata per ciascuno stato ondoso l'energia media annua espressa in MWh.

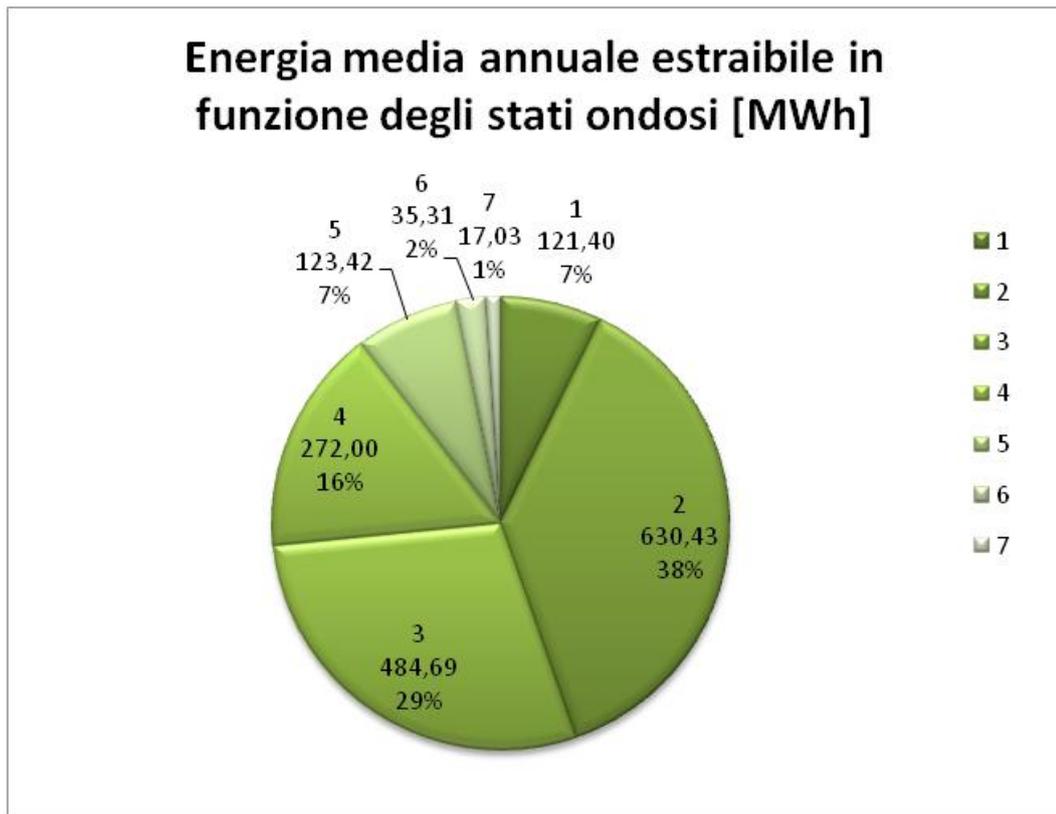


Figura 8.11: energia media annuale estraibile in funzione degli stati ondosi.

Andando a dimensionare il dispositivo per una potenza massima pari a 1007,59 kW, che corrisponde alla potenza media dello stato ondoso 6, si è in grado di sfruttare il dispositivo annualmente al 100% delle sue potenzialità, e di ottenere un'energia media annuale pari a 1684,28 MWh.

Se si presenta però la necessità di risparmiare sui costi e di ridurre le dimensioni, andando a dimensionare il dispositivo per una potenza massima ottenibile pari a 521,58 kW, che corrisponde alla potenza media relativa allo stato 3, si è in grado di sfruttare il dispositivo annualmente al 74% delle sue potenzialità, e di ottenere un'energia media annuale pari a 1236,52 MWh. In questo caso, è possibile osservare che 521,58 kW, è superiore alla potenza massima ottenibile annualmente nello stato ondoso 2, e che pertanto andando a dimensionare per 521,48 kW, ottengo annualmente maggiore energia che se andassi a dimensionare per la potenza massima estraibile dallo stato ondoso 2.

Conclusioni

Il lavoro di tesi è stato indirizzato all'analisi dell'efficienza di un convertitore di energia ondosa di tipo OWC, denominato Leancon. In particolare si è cercato di simulare una procedura di installazione del Leancon in Italia.

Tale analisi è stata eseguita mediante due studi correlati, condotti in successione:

- I. Studio statistico sui dati sperimentali di potenza del dispositivo in scala 1:40.
- II. Valutazione dell'energia prodotta dal dispositivo nel caso di un'ipotetica installazione nel porto di Cagliari.

Lo studio statistico è stato condotto su dati di potenza ottenuti sperimentalmente da prove in laboratorio. Tali prove sono state eseguite nella vasca delle onde del laboratorio di Ingegneria Civile dell'Università di Aalborg (Danimarca) col fine di rilevare serie temporali di potenza prodotta dal dispositivo in scala 1:40 in 5 differenti stati d'onde irregolari, assunti come stati d'onda rappresentativi delle condizioni ondose che si presentano nel Mare del Nord.

Grazie ai risultati ottenuti dallo studio statistico condotto sui dati di potenza acquisiti, è stato possibile ideare una procedura che consenta, dato un particolare stato di mare, caratterizzato da una certa altezza d'onda significativa H_s , e da un certo periodo di picco T_p , di risalire alla media ed alla deviazione standard della distribuzione probabilistica di potenza, e quindi al valore medio di potenza estraibile dal dispositivo in dette condizioni ondose.

Ci si è serviti, pertanto, dei risultati ottenuti da tale studio statistico, per simulare una procedura di installazione del Leancon in Italia, ed in particolare per valutare l'energia media annua estraibile dal dispositivo nel caso di un suo funzionamento a largo del porto di Cagliari. Andando a dimensionare il Leancon per una potenza massima pari a 1007,59 kW si è in grado di sfruttare il dispositivo annualmente al 100% delle sue potenzialità, e di ottenere un'energia media annua pari a 1684,28 MWh, ovvero 1,684 GWh.

A questo punto diventa opportuno, affinché i risultati ottenuti acquisiscano un significato quantitativo, confrontare l'energia prodotta dal Leancon con quella

prodotta da una tecnologia alternativa differente. A tale scopo, si può assumere come termine di paragone una pala eolica installata nel parco eolico di Nurri, località distante 60 Km da Cagliari; tale parco è composto da 26 macchine VESTAS-V52 di altezza pari a 55 metri, con potenza nominale di 850 kW, per una produzione annua stimata di circa 1,7 GWh cadauna. La produzione stimata dell'intero parco è di circa 44,2 GWh annue. Confrontando la produzione energetica media annua del Leancon con quella di una pala eolica del parco di Nurri, si osserva come le due tecnologie siano caratterizzate pressappoco dalla stessa produzione energetica annua.

Nonostante lo studio condotto in questa sede presenti una serie di approssimazioni legate alle procedure sperimentali e statistiche adottate, e non tenga conto di tutti quegli aspetti applicativi da considerare nel caso di un'installazione reale del dispositivo (come per esempio le perdite energetiche nel trasferimento dell'energia da largo a riva), i risultati ottenuti possono essere comunque ritenuti del tutto confortanti ed importanti nell'ottica di una futura installazione di un parco di Leancon a largo del porto di Cagliari.

I progetti attuali, tesi all'utilizzo dell'energia marina, stanno dimostrando la fattibilità e aprendo la strada a sviluppi importanti nel futuro. Potrebbero essere necessari da 10 a 15 anni per raggiungere uno stadio di sviluppo tale da qualificare le fonti energetiche marine come fonti energetiche privilegiate, tali da costituire la base per un futuro pulito, rinnovabile e sostenibile per le prossime generazioni.

Bibliografia

Frigaard, P., Kofoed, J. P. & Nielsen, K. *Assessment of Wave Energy Devices. Best Practice as used in Denmark.* World Renewable Energy Congress (WREC X), Glasgow, Scotland, 21st - 25th July, 2008.

J. P. Kofoed, P. Frigaard. *Hydraulic evaluation of the LEANCON wave energy converter.* Technical Report No. 4. Ottobre 2008.

Jens Peter Kofoed, Peter Frigaard, Erik Friis-Madsen & Hans Chr. Sørensen. *Prototype Testing of the Wave Energy Converter Wave Dragon .* World Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004), 2004.

A. F. de O. Falcão and R.J.A. Rodrigues. *Stochastic Modelling of OWC Wave Power Plant Performance.* Applied Ocean Research 24, 2002.

Paul Byrne. *Stratégie énergétique et énergie des vagues pour les aménagements littoraux et portuaires à l'île de la Réunion.* Rapport ARER. Settembre 2004.

T W Thorpe. *An Overview of Wave Energy Technologies: Status, Performance and Cost.* Seminar at Broadway House, Westminster, London, 30 Novembre 1999.

Annette Muetze, Jennifer Vining. *Ocean Wave Energy Conversion – A Survey.* Power Area and CEME Seminar at UIUC, 2 Ottobre 2006

Annette Bruhns. *Schlange, Drache oder Schnecke?* Spiegel Spezial, 27Marzo 2007.

Claudio Fagarazzi. *La sostenibilità ambientale e lo sviluppo delle risorse rinnovabili.* Seminario, 23 Ottobre 2008.

Deon Retief. *Ocean Energy in South Africa.* Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies Wave Power Seminar, 8 Giugno 2007.

Annette Muetze, Jennifer Vining. *Ocean Wave Energy Conversion.* ECE 699: Advanced Independent Study Report Electrical and Computer Engineering Department University of Wisconsin – Madison, Dicembre 2005

Henk Polinder, Member, IEEE, and Mattia Scuto. *Wave Energy Converters and their Impact on Power Systems,* 2006.

W. Musial. *Status of Wave and Tidal Power Technologies for the United States.* Technical Report NREL/TP-500-43240, August 2008.

Roger Bedard /EPRI. *HydroKinetic Energy “Lay of the Land”.* DOE HydroKinetic Workshop, 26 Ottobre 2005.

Teresa Pontes. *Generic technologies.* Work Package 6. European Wave Energy Network, Ottobre 2002.

Ian Webb, Chris Seaman, Gordon Jackson. *Oscillating Water Column Wave Energy Converter Evaluation Report.* The Carbon Trust. Marine Energy Challenge, 2005.

Jens Peter Kofoed, Peter Frigaard, Erik Friis-Madsen & Hans Chr. Sørensen. *Prototype Testing of the Wave Energy Converter Wave Dragon.* World Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004). Copyright 2004.

Sara Morucci. *La climatologia del moto ondoso.* APAT, Palermo 27-28 Giugno 2007.

Scott Kelly. *Hydrodynamic optimization of a point wave energy converter using laboratory experiments.* Degree of Master of Civil Engineering, The University of Auckland, Febbraio 2007.

<http://www.leancon.com/>

http://hydropower.inl.gov/hydrokinetic_wave/pdfs/hydro_workshop_proceedings.pdf

www.sffe.no/energi_fra_havet/ISSC06_ocean_energy_final.pdf

http://www.wavegen.co.uk/what_we_offer_limpet_islay.htm

http://www.wavec.org/client/files/Triptico_ENG_16-10-06.pdf

<http://www.pico-owc.net/>

<http://www.oceanlinx.com/latest-news.asp>

<http://www.jamstec.go.jp/jamstec/MTD/Whale/>

http://www.sei.ie/Grants/Renewable_Energy_RD_D/Projects_funded_to_date/Ocean/Detailed_Design_of_the_OE_Buoy_Duct_Device_for_Wave_Energy_Conversion/

<http://www.oceanenergy.ie/>

http://academic.sun.ac.za/crses/html/research_topics_files/pdf/MSc%20thesis%20JR%20Joubert.pdf

<http://www.sperboy.com/>