



Ricerca di Sistema elettrico

Caratteristiche costruttive dei sistemi OWC e dei power take-off a questi applicabili

T. Crescenzi, D. Nicolini, A. Fontanella, L. Sipione

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEI SISTEMI OWC E DEI POWER TAKE-OFF A QUESTI APPLICABILI

T. Crescenzi, D. Nicolini, A. Fontanella, L. Sipione (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Obiettivo: Approfondimento delle caratteristiche dei sistemi U-OWC (Oscillating Water Column) e dei power take-off a loro applicabili

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
INTRODUZIONE.....	5
1 LE CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO.....	6
2 POTENZIALE	7
3 CLASSIFICAZIONE DEI DISPOSITIVI WEC.....	8
4 STATO DELL'ARTE DEI SISTEMI OWC	9
4.1 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE	9
4.2 FREQUENZA DI FUNZIONAMENTO	11
4.3 PRINCIPALI REALIZZAZIONI.....	12
4.3.1 OSPREY	13
4.3.2 LIMPET.....	14
4.3.3 Mutriku.....	14
4.3.4 Douro.....	15
4.3.5 Pico	15
4.3.6 U-OWC.....	16
4.3.7 Toftestallen.....	16
4.3.8 OE Buoy	17
4.3.9 Sakata.....	17
4.3.10 Kujukuri.....	18
4.3.11 Sanze	18
4.3.12 Mighty Whale.....	19
4.3.13 Vizhinjam.....	19
4.3.14 Dawanshan.....	20
4.3.15 Shanwei	20
4.3.16 Kembla.....	20
5 STATO DELL'ARTE DEI SISTEMI POWER TAKE-OFF APPLICABILI AGLI OWC.....	22
5.1 TURBINE CONVENZIONALI	22
5.2 TURBINE AUTORETTIFICANTI	23
5.2.1 Turbina Wells.....	23
5.2.2 Turbina ad azione	25
5.3 LA TURBINA DENNISS-AULD	27
5.4 ROTORE SAVONIUS.....	27
5.5 CONFRONTO TRA TURBINE WELLS E TURBINE AD AZIONE	29
5.6 RIFERIMENTI DEI PRINCIPALI STUDI SULLE TURBINE PER DISPOSITIVI OWC.....	29
CARATTERISTICHE DELL'APPARATO U-OWC.....	31
6 CONCLUSIONI.....	36
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	37

Sommario

L'energia da moto ondoso può rappresentare una significativa risorsa per un Paese come l'Italia con notevole estensione delle coste; inoltre lo sviluppo, in questo campo, di tecnologie innovative con prestazioni ottimizzate per il bacino del Mediterraneo può costituire un'importante opportunità commerciale e occupazionale per l'industria italiana.

Le tecnologie per l'utilizzazione dell'energia da moto ondoso sono denominate WEC (Wave Energy Converter); ne sono state concepite e sperimentate diverse, basate su vari principi fisici. Le più promettenti e idonee per il tipo di moto ondoso tipico del Mediterraneo sono quelle basate sul principio della colonna d'acqua oscillante, note come OWC, ed in particolare il sistema U-OWC in fase di avanzato sviluppo da parte dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.

Il punto di forza della tecnologia U-OWC è che si basa su un elemento strutturale, il cassone in calcestruzzo armato, analogo a quelli comunemente utilizzati per le opere portuali come dighe foranee e barriere frangiflutti e svolge la stessa funzione, oltre alla produzione di energia elettrica. Pertanto in caso di costruzione o ristrutturazione di porti, il costo dell'intervento si riduce al costo marginale, relativamente limitato.

In questo rapporto l'ENEA prende in esame alcuni aspetti costruttivi della tecnologia OWC al fine di definire i problemi aperti e le aree specifiche in cui mettere a sistema le proprie competenze scientifiche e tecniche. In particolare vengono esaminati gli aspetti della geometria del cassone e dell'abbinamento del cassone con la turbina.

Nel rapporto sono esaminate le caratteristiche del moto ondoso, il potenziale disponibile, la classificazione dei dispositivi WEC, lo stato dell'arte dei dispositivi OWC, lo stato dell'arte dei sistemi per l'estrazione raccolta dell'energia elettrica (Power Take-off), le caratteristiche dell'apparato U-OWC, quelle dell'impianto sperimentale in fase di allestimento a Reggio Calabria e quelle dell'impianto dimostrativo in fase di costruzione a Civitavecchia.

Introduzione

L'accordo di programma tra Ministero per lo Sviluppo Economico e l'ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, nell'ambito del tema di ricerca "Energia elettrica dal mare", al progetto B.1.4. prevede da parte ENEA lo svolgimento di studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso. Questi studi si potranno sviluppare nel corso di diversi anni e sono attualmente incentrati sullo sviluppo e la sperimentazione di una tecnologia particolarmente promettente, basata sul principio della colonna d'acqua oscillante. Nell'ambito di questi studi il Laboratorio UTRINN-PCI dell'ENEA partecipa sui seguenti aspetti:

1. analisi delle tecnologie disponibili o in fase di sviluppo, al fine di selezionare le più promettenti per le diverse applicazioni, individuare gli elementi di criticità, le possibili soluzioni e le azioni necessarie per favorire la diffusione delle applicazioni e lo sviluppo delle aziende del settore;
2. svolgimento di studi sul comportamento fluidodinamico di sistemi e componenti critici mediante simulazioni numeriche e analisi di dati sperimentali, in collaborazione con le principali aziende, spin-off universitari o organizzazioni di ricerca del settore;

Il presente rapporto si riferisce al punto 1. e costituisce la base per il punti successivo.

La produzione di energia dal moto ondoso, insieme a quella dalle correnti marine, rappresenta per l'Italia una grossa opportunità in conseguenza del suo notevole sviluppo costiero, tuttavia le caratteristiche dei mari che circondano l'Italia rendono poco adatti i dispositivi già sviluppati e utilizzati in altri paesi e si rende quindi necessario uno sviluppo tecnologico specificamente mirato alle particolari condizioni del mare e delle coste italiane. Una prospettiva molto promettente è quella dei dispositivi a colonna d'acqua oscillante (OWC), che possono anche svolgere la funzione di dighe foranee o frangiflutti, consentendo di unire la funzione di opere portuali e di difesa delle coste dall'erosione, con la produzione di energia elettrica.

Le ricerche più avanzate nel campo delle tecnologie OWC sono svolte dall'Università di Reggio Calabria, che ha sviluppato il concetto innovativo di U-OWC, ne ha realizzato diversi prototipi in scala ridotta e sta realizzando un prototipo a piena scala.

Uno degli aspetti critici di questa tecnologia OWC è il comportamento fluidodinamico della camera pneumatica al di sopra della colonna d'acqua oscillante, che se non opportunamente guidato da una conformazione geometrica adeguata, rischia di dissipare energia attraverso attriti alle pareti e vortici interni, penalizzandone la produzione.

L'ENEA ha una lunga esperienza nella simulazione fluidodinamica applicata a diverse tecnologie nel campo dell'energia, ed in particolare delle energie rinnovabili. La collaborazione con l'Università di Reggio Calabria ha l'obiettivo di mettere a punto un modello numerico in grado di prevedere il comportamento dell'aria all'interno della camera pneumatica del dispositivo, in modo da consentire di individuare la conformazione geometrica ottimale con una serie limitata di prove sperimentali.

1 Le caratteristiche del moto ondoso

L'energia del moto ondoso deriva dal movimento dell'acqua in prossimità della superficie libera. Le onde si formano per effetto del vento sulla superficie dell'acqua e si propagano anche per migliaia di chilometri. Dal punto di vista teorico le onde si definiscono stazionarie o progressive; nel primo caso la cresta oscilla verticalmente, ma rimane ferma orizzontalmente, nel secondo caso si sposta anche in direzione orizzontale (v. fig. 1).

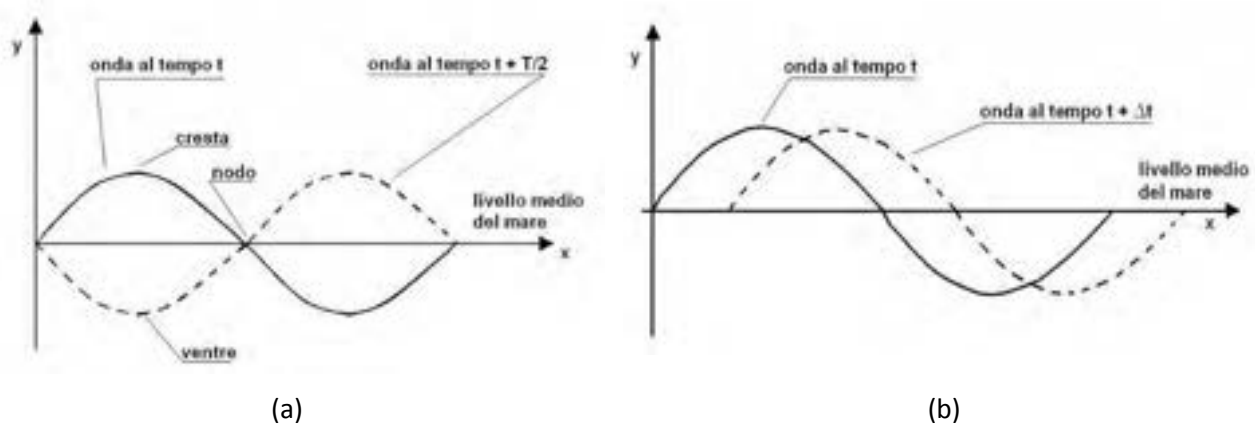


Fig. 1 – Onda stazionaria (a) e onda progressiva (b)

Le onde reali hanno caratteristiche di frequenza e ampiezza che variano nel tempo e nei diversi punti del campo e si descrivono mediante parametri equivalenti come l'altezza significativa e il periodo significativo.

L'energia teorica associata al moto ondoso, espressa in termini di potenza per unità di larghezza del fronte d'onda, può essere stimata nel campo della teoria lineare dalla seguente relazione:

$$P = \frac{H_s^2 \cdot \rho \cdot g^2 \cdot T}{64 \cdot \pi}$$

con: P potenza (kW/m)
 H_s altezza significativa dell'onda (m)
 ρ densità dell'acqua di mare (1025 kg/m³)
 g accelerazione di gravità (9,81 m/s²)
 T periodo (s)

In prossimità della costa le onde interagiscono con il fondale e perdono energia, ma possono anche acquistarne per effetto di concentrazione ed amplificazione dovuta a fenomeni di rifrazione e riflessione.

2 Potenziale

Le zone con moto ondoso di maggiore contenuto energetico sono quelle esposte alle direzioni principali dei venti oceanici ed in particolare le coste a nord-ovest del Nord America, a sud-ovest del Sud America, le coste occidentali dell'Europa, le coste del Sud Africa, le coste neozelandesi e quelle meridionali dell'Australia. I valori tipici medi annuali di energia del moto ondoso in mare aperto, nelle zone più favorevoli, variano tra 20 e 70 kW/m con punte anche di 100 kW/m (v. fig. 2).

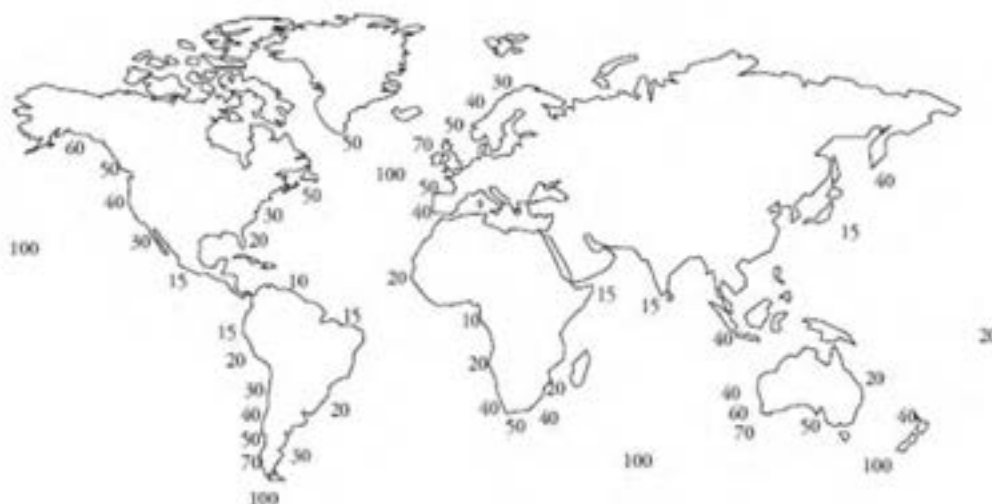


Fig. 2 – Livelli medi di energia delle onde (kW/m)

Sulle coste italiane il mar Adriatico presenta un valore medio di energia delle onde di circa 2 kW/m, il mar Jonio e il Tirreno medio hanno valori medi di circa 3 kW/m e il Tirreno inferiore di circa 4 kW/m. Sulla costa nord occidentale della Sardegna si raggiungono circa 9 kW/m. In fig. 3 sono rappresentati a titolo di esempio i valori medi indicativi sulle coste italiane; per valori puntuali più aggiornati si può fare riferimento al sito ENEA http://utmea.enea.it/waves_gis/

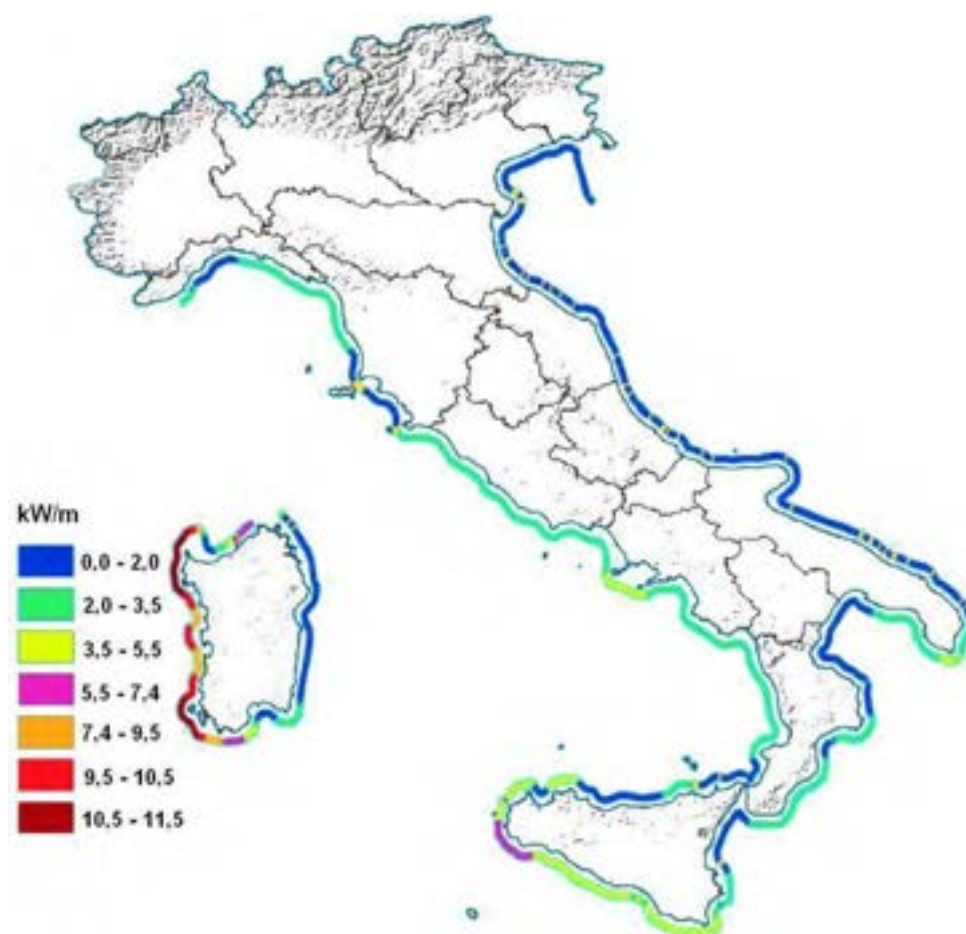


Fig. 3 – Livelli medi indicativi di energia delle onde sulle coste italiane (Fonte: ENEA)

L'energia del moto ondoso presenta diversi vantaggi rispetto ad altre fonti rinnovabili:

- maggiore diffusione e densità di energia;
- minore variabilità oraria e giornaliera;
- maggiore prevedibilità;
- maggiore continuità del fenomeno.

A fronte di questi vantaggi, l'energia del moto ondoso presenta delle limitazioni nel suo utilizzo, in particolare:

- irregolarità dell'ampiezza, della fase e della direzione del moto;
- elevato carico strutturale in caso di condizioni meteorologiche estreme.

Questi aspetti rendono complessa la progettazione di apparati per lo sfruttamento di questa fonte di energia.

3 Classificazione dei dispositivi WEC

I dispositivi per generare energia elettrica del moto ondoso sono denominati WEC (Wave Energy Converter). Sono stati ideati molti dispositivi WEC, di cui diversi sperimentati in scala ridotta e alcuni anche in piena scala in mare. Generalmente vengono classificati in base alla posizione rispetto alla costa in cui sono installati; una seconda classificazione fa riferimento alla loro posizione rispetto alla direzione di propagazione del moto ondoso, mentre una terza classificazione si basa sul loro principio di funzionamento (v. tab 1).

In base alla posizione rispetto alla costa, i dispositivi WEC si distinguono in:

- shore-line, installati sulla linea di costa;
- near-shore, in acque poco profonde in prossimità della costa;
- off-shore, in mare aperto.

In base alla posizione rispetto alla direzione del moto ondoso, si dividono in:

- assorbitori puntuali, indifferenti alla direzione del moto ondoso, di cui sfruttano solo il moto verticale;
- attenuatori, posti parallelamente alla direzione di propagazione del moto ondoso;
- terminatori, posti perpendicolarmente alla direzione di propagazione del moto ondoso.

In base al principio di funzionamento si classificano in:

- dispositivi a tracimazione;
- dispositivi a corpi oscillanti;
- dispositivi a colonna d'acqua oscillante.

I dispositivi a colonna d'acqua oscillante (OWC, Oscillating Water Column) sono tra i più diffusi e sicuramente tra i più promettenti per una più ampia diffusione perché presentano una serie di vantaggi in termini di prestazioni, di limitata complessità e di ridotto impatto. Si basano sull'azione di una colonna d'acqua oscillante all'interno di un contenitore chiuso nella parte superiore e in collegamento con il mare in quella inferiore. Per azione del moto ondoso la colonna d'acqua oscilla verticalmente, comprimendo ciclicamente il cuscino d'aria sovrastante, e convogliando il flusso d'aria pulsante attraverso un condotto. Il moto pulsante dell'aria nel condotto può azionare una turbina e generare energia elettrica.

I dispositivi OWC sono stati ampiamente sperimentati in condizioni reali di funzionamento e si può ritenere che non siano lontani dalla maturità commerciale, anche se restano ancora da risolvere diversi problemi di carattere tecnico e da approfondire diversi aspetti scientifici.

Tab. 1 – Criteri di classificazione dei dispositivi WEC

CRITERIO	CATEGORIE		
Posizione rispetto alla costa	Shore-line	Near-shore	Off-shore
Posizione rispetto alla direzione di propagazione del moto ondoso	Assorbitori puntuali (indifferenti)	Attenuatori (paralleli)	Terminatori (perpendicolari)
Principio di funzionamento	Tracimazione	Corpi oscillanti	Colonna d'acqua oscillante

4 Stato dell'arte dei sistemi OWC

4.1 Caratteristiche costruttive

I sistemi a colonna d'acqua oscillante (OWC) sono dispositivi per la produzione di energia dal moto ondoso costituiti da una struttura di cemento o acciaio, parzialmente sommersa, aperta al di sotto della superficie dell'acqua e al cui interno rimane intrappolata l'aria al di sopra del pelo libero dell'acqua. Il moto oscillatorio del pelo libero dell'acqua all'interno dell'apparato, prodotto dal moto ondoso, produce a sua volta un flusso d'aria che aziona una turbina accoppiata ad un generatore elettrico (v. fig. 4).

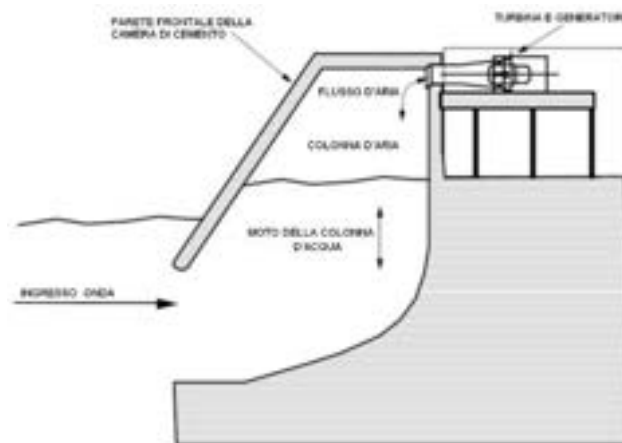


Fig. 4 – OWC - Oscillating Water Column

I sistemi OWC presentano diverse caratteristiche interessanti, tra cui il ridotto impatto ambientale, potendo essere inglobati nelle strutture tipiche presenti sulle coste, quali le dighe foranee e i frangiflutti, inoltre non interferiscono sensibilmente con l'ambiente marino e con le attività umane che si svolgono sulle coste, come navigazione, pesca, balneazione ecc. e possono essere di ausilio per tali attività, come l'alimentazione delle boe luminose.

Sono stati proposti un'ampia varietà di sistemi, ma soltanto alcuni prototipi a piena scala sono stati costruiti e installati in acque aperte. La maggior parte dei sistemi di prima generazione sono localizzati sulle coste o vicino alla costa, fissati al fondo del mare o su scogliere. Ci sono anche proposte per l'installazione in mare aperto. Gli apparati collocati sulla linea di costa hanno il vantaggio di una più semplice installazione e manutenzione e non richiedono l'ancoraggio in acque profonde, né lunghi cavi sottomarini. Il minore contenuto energetico delle onde sotto costa può essere parzialmente compensato con opportuna localizzazione, attraverso la concentrazione del moto ondoso a seguito dei fenomeni di rifrazione e diffrazione.

Fin dall'inizio degli anni '80 è stato scoperto teoricamente e dimostrato sperimentalmente che il processo di assorbimento dell'energia delle onde può essere aumentato estendendo la struttura della camera mediante pareti sporgenti, naturali o artificiali, nella direzione delle onde, in modo da formare un imbocco o collettore. Questo concetto è stato messo in pratica nella maggior parte dei prototipi.

Generalmente la struttura della camera degli OWC è in cemento, più raramente in acciaio, con potenze installate fino a 500 kW per quelli realizzati e fino a 2 MW per quelli proposti ma sono stati anche costruiti impianti più piccoli per finalità di ricerca o per frazionare la potenza prodotta su più unità.

Il progetto e la costruzione delle strutture, oltre alla turbina ad aria, sono i punti critici della tecnologia OWC e incidono maggiormente sul costo di produzione dell'energia; il costo maggiore è legato alle opere civili.

L'integrazione della struttura dell'impianto nelle barriere frangiflutti ha diversi vantaggi, in particolare i costi di costruzione sono ripartiti tra le due opere e le operazioni di accesso per la costruzione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti risultano semplificate.

La struttura può essere gettata in loco, prosciugando il tratto di costa con apposite barriere oppure può essere prefabbricata in cantiere e successivamente trasportata e parzialmente affondata sulla costa. La parte superiore della struttura che emerge dall'acqua è provvista di aperture per l'installazione delle turbine e per eventuali ispezioni.

Oltre alle strutture fisse, sono state proposte e sperimentate diverse soluzioni OWC di tipo galleggiante. Questi apparati sono costituiti essenzialmente da condotti ancorati al fondo in modo lasco, con un'estremità aperta e immersa nell'acqua e l'altra estremità fuori dell'acqua, con la camera d'aria e la turbina. In seguito al movimento del condotto prodotto dalle onde, il livello dell'acqua al suo interno varia e l'aria della camera si comprime e decomprime azionando la turbina. Lo schema più semplice è costituito da un tubo verticale (Spar Buoy, v. fig. 5) a simmetria assiale, insensibile alla direzione delle onde, che consiste essenzialmente di un lungo tubo verticale parzialmente sommerso, fissato a un galleggiante che si muove verticalmente. La lunghezza del tubo determina la frequenza di risonanza della colonna d'aria all'interno del tubo stesso. Il flusso dell'aria spostata aziona una turbina in grado di alimentare, per esempio un segnale luminoso, quindi questo dispositivo è utilizzato come boa di segnalazione.

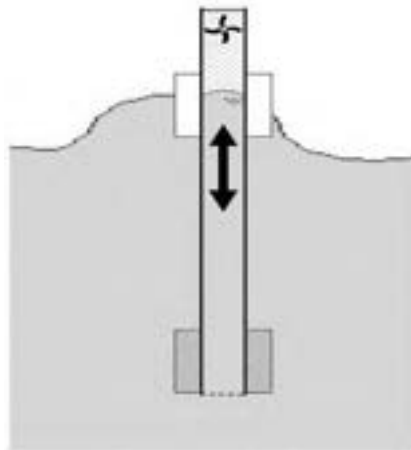


Fig. 5 – OWC galleggiante a condotto verticale (Spar Buoy)

Una soluzione più complessa per l'OWC galleggiante utilizza tubi orizzontali ricurvi con tratto verticale dalla parte della camera pneumatica; si sfrutta quindi il movimento di beccheggio e la lunghezza del condotto può determinare una frequenza di oscillazione dell'aria più favorevole per il funzionamento della turbina (v. fig. 6). Sono allo studio anche soluzioni con condotti inclinati, in modo da sfruttare sia il moto di innalzamento, sia il beccheggio.

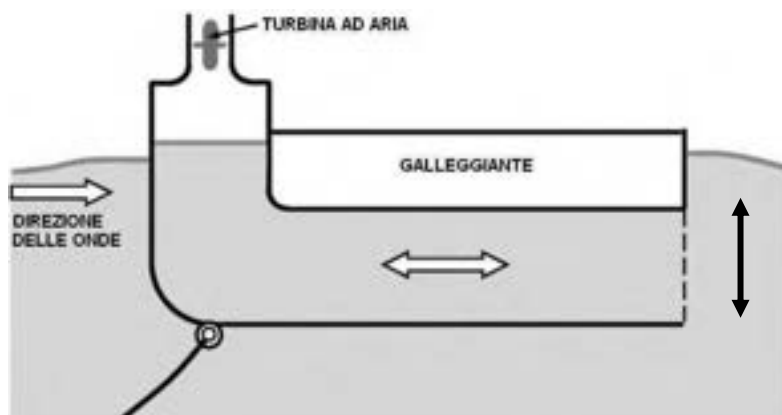


Fig. 6 – OWC galleggiante a condotto orizzontale (Backward Bent Duct Buoy)

4.2 Frequenza di funzionamento

Gli studi teorici sugli OWC mostrano che per ottenere le migliori prestazioni in termini di recupero di energia la frequenza propria dei convertitori dovrebbe essere uguale alla frequenza delle onde, in questo

modo l'impulso forzante dovuto alle onde avrebbe impatto sul sistema in accordo con la sua frequenza naturale.

Si può prendere come esempio l'altalena che oscilla: se si dà l'impulso nel momento in cui questa si trova ad un estremo del suo ciclo si ottiene con poco sforzo un incremento della sua oscillazione, viceversa lo stesso impulso in un momento diverso ha effetto minore o addirittura negativo.

Similmente all'altalena un sistema OWC ha il suo periodo di oscillazione propria o frequenza naturale. Questo dipende da vari parametri del sistema, in particolare da:

- forma e dimensioni della camera;
- volume dell'aria nella camera;
- smorzamento prodotto dalla turbina.

La coincidenza tra la frequenza naturale del dispositivo e quella delle onde è però molto difficile perché la prima è generalmente molto più alta della seconda, che nella realtà poi non ha una singola frequenza, ma è la composizione di più frequenze. Inoltre le frequenze delle onde non sono costanti nel tempo perché dipendono dalla variabilità casuale dei venti.

Pertanto è di fondamentale importanza nella progettazione della geometria dei dispositivi OWC la frequenza di risonanza della colonna d'acqua oscillante al loro interno e le caratteristiche fluidodinamiche del flusso d'aria che agisce sulla turbina. L'efficienza del sistema nella produzione di energia dipende quindi dal corretto accoppiamento tra frequenza del moto ondoso, geometria delle camere del dispositivo e caratteristiche della turbina.

Per ovviare a queste difficoltà sono state proposte alcune soluzioni innovative, tra cui le cavità multirisonanti, i sistemi a controllo attivo e il concetto U-OWC.

La soluzione a cavità multirisonante (MRC, multiple resonant cavity) è stata sviluppata dalla Orecon Ltd, del Regno Unito, per impianto OWC galleggiante in cui ogni cavità è composta da tre camere con uguale sezione, ma diverso volume e quindi diversa frequenza di oscillazione, in modo da coprire un campo più ampio di frequenze d'onda.

I sistemi a controllo attivo agiscono sul dispositivo di conversione per modificarne le caratteristiche in base alla frequenza delle onde incidenti.

Nel sistema U-OWC, sviluppato dall'Università di Reggio Calabria, descritto di seguito, le onde non entrano direttamente nella struttura, ma agiscono da forzante esterna con un rendimento maggiore.

Quindi a fronte di una relativa semplicità concettuale, lo sviluppo e la messa a punto dei dispositivi OWC risulta notevolmente impegnativa sia dal punto di vista teorico che sperimentale, come dimostrano le difficoltà incontrate in diversi impianti sperimentali e i problemi precedentemente accennati ancora aperti.

4.3 Principali realizzazioni

I dispositivi OWC sono attualmente in fase di sviluppo e hanno già avuto applicazioni di carattere dimostrativo in diversi Paesi e in alcuni casi sono anche stati connessi alla rete elettrica; in Europa sono maggiormente impegnati in questo campo il Regno Unito, la Spagna, il Portogallo, l'Italia, la Norvegia e l'Irlanda. Fuori dell'Europa partecipano a questi sviluppi soprattutto il Giappone, l'India, la Cina e l'Australia.

I principali impianti OWC realizzati o in progetto sono elencati in tab. 2.

Tab. 2 – Principali impianti OWC

Paese	Impianto	kW	Tipo	Località	Esercizio
U.K.	Osprey	500	(2)	Dounreay, Scozia	chiuso nel 1995
	Limpet	75	(1)	Islay, Scozia	dal 1988
	Limpet 500	500	(1)	Islay, Scozia	dal 2000
Spagna	Mutriku	296	(1)	Baia di Mutriku	dal 2011
Portogallo	Douro	750		Porto	sospeso
	Pico	400	(1)	Azzorre	dal 2001
Italia	REWEC3	?	(1)	Civitavecchia	In costruzione
Norvegia	Toftestallen	500	(1)	Bergen	1985-1988
Irlanda	OE Buoy	40	(3)	Galvay	dal 2007
	Sakata	60	(1)	Sakata	dal 1988
Giappone	Kujukuri	30		Kujukuri	dal 1987
	Sanze	40	(1)	Sanze	1983-1984
	Mighty Whale	110	(3)	Baia di Gokasho	dal 1998
India	Vizhinjam	150	(1)	Trivandrum	1990-1995
Cina	Dawanshan	3	(1)	Dawanshan	dal 1990
	Shanwei	100	(1)	Guangdong	Dal 2001
Australia	Kembla	450	(2)	Port Kembla	dal 2004

Tipo: (1) fisso sulla costa; (2) fisso al fondo; (3) galleggiante

Si riportano di seguito alcune caratteristiche dei principali impianti OWC sviluppati nei diversi Paesi.

Regno Unito

4.3.1 OSPREY

OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable Energy - v. fig. 7), è un tipo di impianto OWC per installazioni fino a 1 km di distanza dalla costa, su fondale con profondità fino a 15 metri.



Fig. 7 – Modello 3D del dispositivo OSPRAY 1

OSPREY 1 è la prima realizzazione di questo concetto, costruito nel 1995 per essere installato 100 m al largo della costa di Dounreay nel nord della Scozia. L'impianto comprende un collettore in acciaio a camera rettangolare con cisterne di zavorra trapezoidali, sempre in acciaio, per un peso complessivo di 750 tonnellate, ancorato al fondo per gravità. Sulla parte superiore del collettore è posto il modulo di potenza, contenente il gruppo turbina - generatore ad asse verticale e le apparecchiature di controllo.

Durante le operazioni di installazione un'onda gigantesca ha danneggiato irrimediabilmente il sistema, che è stato poi abbandonato. La potenza di progetto era 2 MW.

La società Wavegen ha successivamente riprogettato il dispositivo come OSPREY 2, con una nuova struttura in acciaio composito e calcestruzzo, ma non ha avuto seguito la costruzione.

4.3.2 LIMPET

LIMPET (Land Installed Marine Pneumatic Energy Transfer) è un dispositivo OWC da installare sulla costa (v. fig. 8) sviluppato a partire dalle ricerche svolte dalla Queen University di Belfast nel 1985.



Fig. 8 – Schema dell'impianto LIMPET

LIMPET 500 è l'impianto da 500 kW costruito vicino Portnahaven, sull'isola di Islay, in Scozia. La costruzione, iniziata nel 1998 è stata completata nel 2000. Il sistema comprende una struttura in cemento con l'unità di generazione sulla parete posteriore. Utilizza turbine Wells collegate direttamente all'albero del generatore e racchiuse in un apposito locale macchine. Sullo scarico dell'aria c'è un attenuatore acustico.

Il dispositivo comprende 3 camere, ciascuna di dimensioni 6 x 6 metri, inclinate di 40° rispetto al piano orizzontale. La forma inclinata delle camere ha mostrato di offrire un percorso più agevole per l'ingresso e l'uscita dell'acqua, con minore turbolenza e minori perdite di carico.

Nella parte superiore il LIMPET ha una singola apertura, attraverso la quale l'aria è forzata, muovendo due turbine Wells controrotanti. Ogni turbina aziona un generatore di 250 kW, per una potenza massima complessiva di 500 kW. Questo impianto ha soddisfatto gran parte del fabbisogno di energia elettrica dell'isola di Islay da quando è diventato operativo nel 2000.

Spagna

4.3.3 Mutriku

L'impianto di Mutriku, nei Paesi Baschi, è integrato nella barriera frangiflutti della baia di Mutriku nel Golfo di Biscaglia (v. fig. 9)

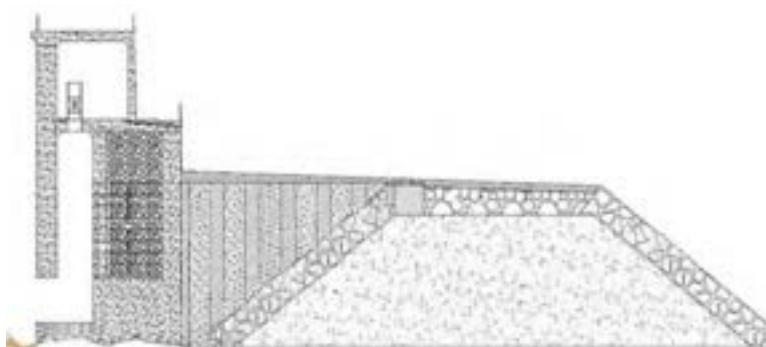


Fig. 9 – Sezione dell'impianto Muriku

L'impianto è costituito da 16 camere e 16 gruppi di turbine Wells con generatore elettrico da 18,5 kW ciascuno per un totale di 296 kW. È operativo dal novembre 2011.

Le dimensioni della camera d'aria sono: 4,5 m di larghezza, 3,1 m di profondità e 10 metri altezza. La tecnologia è della Wavegen, società controllata dalla Voith Siemens Hydro ed è stata precedentemente testata in Scozia nell'impianto dimostrativo Limpet.

Portogallo

4.3.4 Douro

Il progetto dell'impianto di Douro, da 750 kW, è stato proposto per un finanziamento europeo nel 2006, ma dopo la fase progettuale non è stato ancora realizzato. Il progetto prevede l'installazione su una diga frangiflutti alla foce del fiume Douro, presso la città portoghese di Porto e consiste in due camere equipaggiate con 3 turbine Wells. (v. fig. 10)



Fig. 10 – Progetto dell'impianto di Douro

4.3.5 Pico

L'impianto di Pico (v. fig. 11) è installato sulla costa nord dell'isola di Pico, la maggiore del gruppo centrale delle isole Azzorre. La località è caratterizzata da un grande potenziale energetico, favorito dalla forma della costa, che agisce come un concentratore naturale di energia. L'impianto, progettato come unità di prova in scala 1:1, ha una potenza complessiva di 400 kW e utilizza turbine tipo Wells. L'energia elettrica viene immessa nella rete locale.

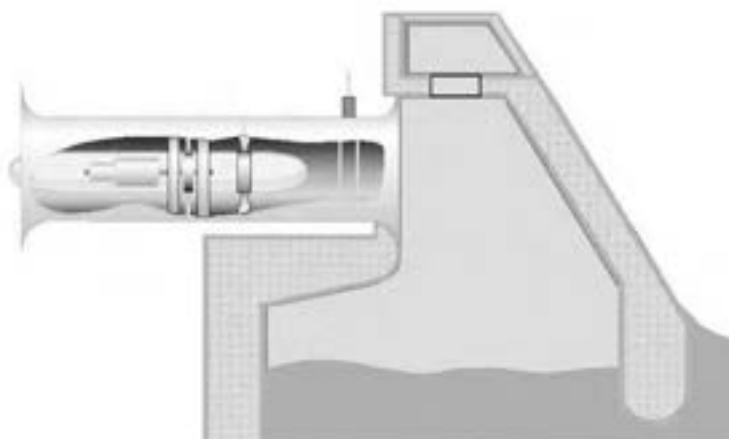


Fig. 11 – Impianto OWC all'isola di Pico (Azzorre)

La costruzione delle opere civili è durata dal 1996 al 1998 e l'impianto è stato completato alla fine del 1999. A causa di alcuni danni da inondazione alle apparecchiature elettriche e di controllo, l'entrata in servizio è avvenuta nel 2001.

L'impianto comprende un collettore di calcestruzzo gettato in loco, con la parete posteriore rinforzata e l'unità di generazione installata immediatamente dietro il restringimento superiore della parete superiore. La turbina è di tipo Wells ad asse orizzontale e insieme al generatore è situata in sala macchine.

Italia

4.3.6 U-OWC

In Italia da diversi anni opera in questo settore l'Università Mediterranea di Reggio Calabria, che ha già realizzato diversi prototipi in scala ridotta e sta portando avanti la progettazione e la costruzione di un prototipo in scala reale di un concetto innovativo denominato U-OWC. Per le caratteristiche si rinvia al capitolo dedicato a questa tecnologia.

Norvegia

4.3.7 Toftestallen

L'impianto pilota di Toftestallen da 500 kW, a colonne d'acqua multi risonanti, è stato costruito dal maggio 1984 al novembre 1985. Il dispositivo è costituito da una torre in acciaio alta circa 20 m al di sopra di una struttura in calcestruzzo fissata al fondo del mare (v. fig. 12).

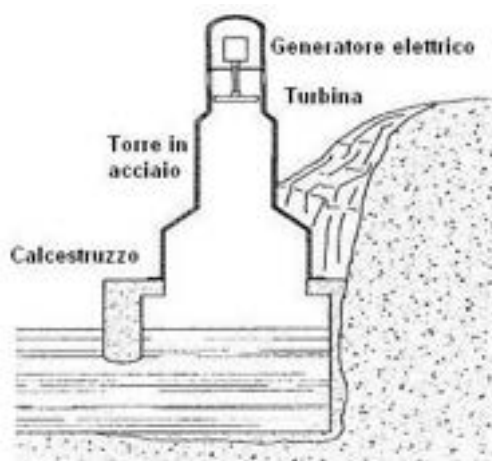


Fig. 12 – Impianto di Toftestallen

Il sistema utilizza una versione modificata della turbina Wells, in grado di funzionare a 1500 rpm. La potenza di generazione è compresa tra 100 e 500 kW.

Il sistema ha funzionato in modo soddisfacente, fornendo energia elettrica alla rete, ma nell'ultima settimana del 1988 è stato gravemente danneggiato dalle cattive condizioni metereologiche e successivamente dismesso.

Irlanda

4.3.8 OE Buoy

Il dispositivo denominato OE Buoy ha operato a Spiddal, vicino Galway, tra il 2007 e il 2009 come impianto di prova in scala 1:2. Dal marzo 2011 è stato ricollocato nello stesso sito per acquisire dati nell'ambito del progetto europeo Cores. È un dispositivo OWC galleggiante a tubi orizzontali, con imboccatura rivolta lontano dalla direzione dell'onda, in grado di sfruttare con buona efficienza i movimenti del sistema galleggiante prodotti dalle onde. Il sistema ha una forma compatta ed è realizzato con tecniche di costruzione navale convenzionali. (v. fig 13)



Fig. 13 – Impianto OE Buoy

Giappone

4.3.9 Sakata

L'impianto dimostrativo di Sakata è costituito da OWC con cinque camere, inserito nella diga foranea del porto industriale di Sakata, in Giappone. È operativo dal 1989 con solo tre camere utilizzate per la produzione di energia mediante un gruppo turbo-generatore da 60 kW, che potrà essere sostituito da uno da 130 kW (v. fig. 14).

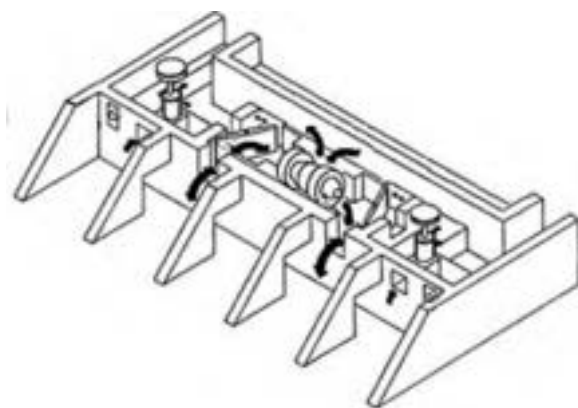


Fig. 14 – Schema dell’impianto OWC di Sakata

La tecnica di costruzione del cassone prevede la realizzazione del getto in cemento armato in bacino di carenaggio, il rimorchio nella posizione finale e il successivo completamento in loco.

Le dimensioni del cassone sono circa 20 m x 25 m in pianta e 27 m di altezza; la profondità operativa dell'acqua è di circa 18 m . La parete anteriore del cassone è inclinata a 45° per ridurre la spinta orizzontale e favorirne la stabilizzazione mediante la componente verticale verso il basso.

4.3.10 Kujukuri

L’impianto OWC da 30 kW di Kujukuri (v. fig. 15), costruito nel 1987, con 10 camere, si discosta dai sistemi precedenti per il collegamento tra le camere per mezzo di un collettore ad alta pressione. In questo modo è richiesta un’unica turbina che lavora a portata relativamente uniforme.



Fig. 15 – Impianto OWC di Kujukuri

4.3.11 Sanze

L’impianto OWC da 40 kW di Sanze sulla costa occidentale del paese (v. fig. 16), costruito nel 1983 è il primo sistema del genere a grandezza naturale ed è costruito sulla costa, in un’insenatura naturale che concentra l'energia delle onde sull’ingresso del dispositivo. È dotato di due turbine Wells. Ha funzionato per sei mesi con buoni risultati.



Fig 16 - Impianto OWC di Sanze

4.3.12 Mighty Whale

Mighty Whale (v. fig. 17) è un dispositivo OWC galleggiante, sviluppato in Giappone e realizzato come prototipo a piena scala nel 1996 e provato in mare a partire dal 1998. L'apparato consiste in una struttura galleggiante lunga 50 metri, larga 30 metri, con pescaggio di 12 metri e dislocamento di 4400 tonnellate con 3 camere affiancate nella parte frontale e serbatoi di galleggiamento. Ogni camera ha una turbina e un generatore. La potenza installata complessiva è di 110 kW. L'apparato è stato piazzato all'imboccatura della baia di Gokasho, nella prefettura di Mie, in Giappone nel 1998 e testato per molti anni.

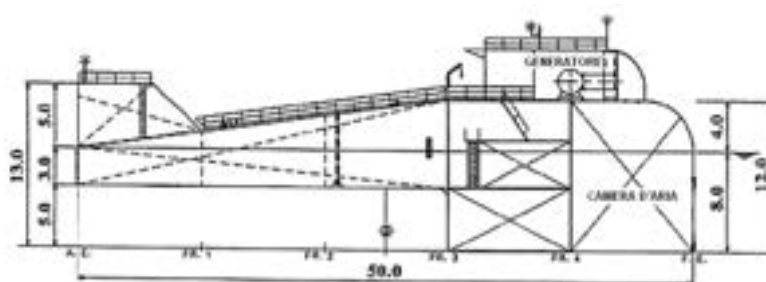


Fig. 17 – Mighty Whale

India

4.3.13 Vizhinjam

L'impianto pilota OWC di Vizhinjam, da 150 kW, è stato costruito nel 1991 davanti alla diga foranea del porto per pescherecci di Vizhinjam, presso Trivandrum in India (v. fig. 18). Ha un cassone in cemento armato cellulare da 3000 tonnellate sormontato da una torre di acciaio. Il cassone è largo 23 m, lungo 17 m e alto 15 m. L'ingresso della camera ha 10 m di larghezza e 6 m di altezza. La parte superiore della camera ha un doppio guscio di dimensioni 10 m x 8 m. Il modulo di potenza si trova nella torre in acciaio, con diametro 2 m e altezza 3 m.



Fig. 16 – Vista dell’impianto OWC di Vizhinjam

L'efficienza idrodinamica è incrementata mediante il prolungamento delle pareti laterali della camera verso il mare, in modo da regolare le frequenze d'onda diverse in un range ottimale. La turbina è collegata direttamente alla rete elettrica locale.

L'impianto è stato utilizzato per testare diversi tipi di apparecchiature di generazione; ha funzionato con successo, fornendo dati per lo sviluppo di un nuovo progetto di 10 unità OWC con una capacità totale complessiva di 1,1 MW.

Cina

4.3.14 Dawanshan

L'impianto sperimentale da 3 kW è installato sulla costa dell'isola di Dawanshan, alla foce del fiume Pearl nel Mar della Cina meridionale. Il dispositivo ha una camera d'aria larga 4 m e profonda 3 m, collegata con una turbina Wells da 3 kW. Il sistema ha operato per breve tempo a scopo di test e le prove vennero considerate soddisfacenti.

4.3.15 Shanwei

L'impianto da 100 kW di Shanwei, nella provincia di Guangdong, è un OWC installato sulla costa, costituito da due camere con una larghezza totale di 20 m. Ha iniziato ad operare nel 1999.

Australia

4.3.16 Kembla

La compagnia australiana Energethec, che nel 2007 ha cambiato il suo nome in Oceanlinx Ltd. ha sviluppato una tecnologia che utilizza un collettore a forma di parabola e lo ha sperimentato a Kembla, in Australia, nel 2005; la principale novità è la notevole dimensione della parete convergente rispetto all'apparato OWC. La fig. 19 riporta un modello del dispositivo.



Fig. 19 – Modello dell’impianto OWC di Kembla

L’impianto di Kembla è un OWC dimostrativo da 300 kW, 200 m al largo presso il porto di Kembla, a circa 100 chilometri a sud di Sydney. Ha una struttura a frangiflutti portuale con cavi di ormeggio e gambe di appoggio sul fondo marino. La turbina utilizzata è la Denniss-Auld, una turbina bidirezionale, alternativa alla turbina Wells. È entrato in servizio alla fine del 2004 per un esercizio dimostrativo di 3 anni. Nel 2009 l’impianto è stato ristrutturato e portato a 450 kW col nome MK1. Nel 2010 sullo stesso schema venne realizzato un terzo impianto da 2,5 MW denominato MK3PC che però, dopo 3 mesi di funzionamento soddisfacente con collegamento alla rete elettrica, venne affondato da una tempesta.

Il primo dispositivo, da 300 kW, aveva circa 36 m di lunghezza, 35 m di larghezza e imboccatura di forma parabolica per concentrare l'energia delle onde su una piccola area: per ottenere la massima efficienza di cattura, il dispositivo deve essere allineato in modo che la direzione di propagazione delle onde sia parallela all'asse di simmetria del concentratore parabolico.

5 Stato dell'arte dei sistemi power take-off applicabili agli OWC

L'energia del flusso d'aria prodotto nei sistemi OWC va convertita in energia meccanica per la produzione di energia elettrica. Questo flusso si caratterizza per l'alternanza, cioè l'inversione del flusso d'aria ad ogni semiperiodo, e la notevole variazione di intensità legata alla variabilità nel tempo del fenomeno ondoso. Pertanto nei dispositivi OWC occorre utilizzare macchine con caratteristiche specifiche, in grado di mantenere il verso di rotazione al variare della direzione del flusso e di mantenere efficienze soddisfacenti nelle diverse condizioni di lavoro.

Per ottimizzare le prestazioni dei sistemi OWC, occorre considerare l'insieme costituito dalla camera con la colonna d'acqua e dalla turbina, i due sottosistemi devono funzionare ben accoppiati tra loro, infatti la caduta di pressione nel flusso d'aria esercitato dalla turbina influenza l'efficienza della conversione dell'energia delle onde in potenza pneumatica nella camera OWC, che a sua volta influisce sul flusso di aria che muove la turbina. Il livello ottimale di caduta di pressione nel condotto dell'aria è quello che massimizza l'efficienza di conversione globale del sistema.

I dispositivi utilizzabili per estrarre l'energia dal flusso d'aria sono principalmente le turbine convenzionali, con opportuni accorgimenti, e le turbine auto rettificanti, tra cui principalmente la turbina Wells nelle sue diverse versioni, le turbine ad azione a due distributori e alcune turbine speciali tra cui il rotore Savonius e la turbina Denniss-Auld.

5.1 Turbine convenzionali

E' possibile utilizzare turbine convenzionali dopo aver rettificato il flusso d'aria alternato con un sistema di valvole di non ritorno (v. fig. 20).

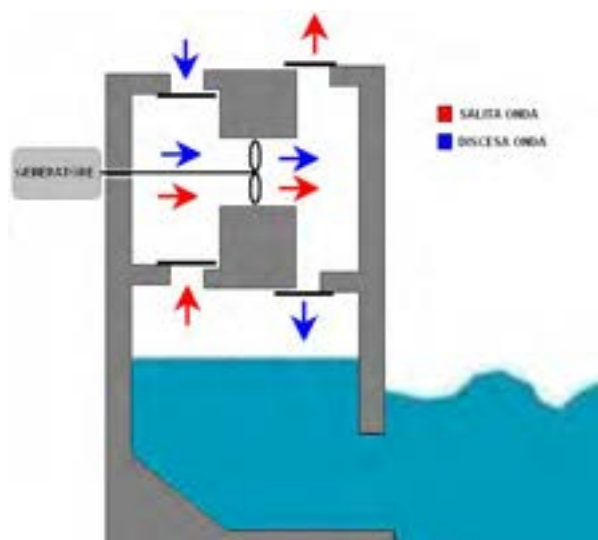


Fig. 20 - Sistema a flusso d'aria con verso costante

Un esempio di uso di turbina convenzionale con flusso d'aria rettificato tramite valvole è la boa di navigazione concepita da Y. Masuda (v. fig. 21).

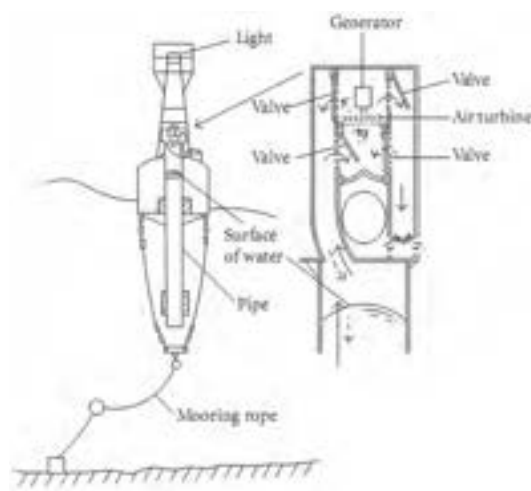


Fig. 21 - Boa di navigazione Masuda

Dal 1965 oltre un migliaio di queste boe alimentate dall'energia del moto ondoso sono state prodotte e commercializzate nel mondo; alcune sono state operative per oltre 30 anni.

Tuttavia il sistema di rettificazione del flusso d'aria presenta perdite di carico, è complicato e di difficile manutenzione e negli impianti più grandi c'è il problema delle dimensioni delle valvole.

5.2 *Turbine autorettificanti*

Le turbine autorettificanti, hanno rotazione unidirezionale anche per flussi d'aria alternati; sono attualmente ritenute i dispositivi più adatti per gli impianti OWC, nonostante abbiano rendimento inferiore rispetto alle turbine convenzionali.

Sono molte le turbine autorettificanti proposte e c'è una grande attività di ricerca e sviluppo in questo campo.

5.2.1 *Turbina Wells*

La più utilizzata è la turbina Wells. Fu inventata dal Prof. Allan Wells della Queen's University di Belfast alla fine degli anni 1970.

La turbina di tipo assiale è autorettificante grazie al profilo simmetrico della pala: questa è spinta sempre nella stessa direzione, indipendentemente dalla direzione del flusso d'aria (v. fig. 22).

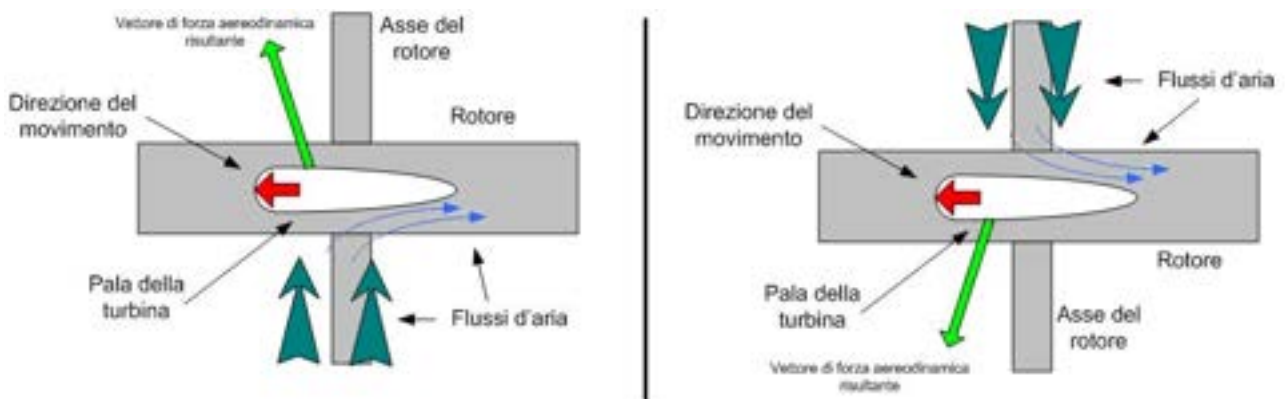


Fig. 22 - Schema di funzionamento della turbina Wells

Le caratteristiche positive della turbina Wells sono:

- costo relativamente basso, semplicità di costruzione;
- efficienza di picco abbastanza buona;
- possibilità di utilizzare un generatore di corrente meno costoso e maggiore immagazzinamento di energia per effetto volano, grazie all'alto rapporto che c'è tra velocità di rotazione della turbina e velocità del flusso d'aria.

Le caratteristiche negative sono:

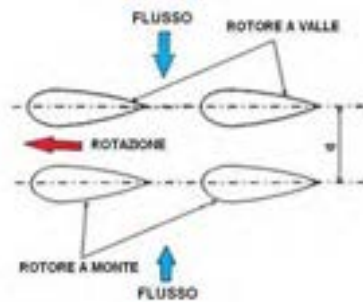
- coppia bassa o anche negativa per portate relativamente basse (eventuale difficoltà di avviamento);
- forte caduta di potenza, a causa delle perdite aerodinamiche dovuta a stallo, per portate al di sopra di un certo valore;
- sensibilità alle sollecitazioni ad alto numero di giri;
- rumorosità ad alto numero di giri;
- diametro elevato della turbina.

Oltre alla più semplice turbina Wells, nella versione iniziale a rotore singolo e senza distributore, sono state costruite diverse versioni più complesse e costose per migliorarne l'efficienza:

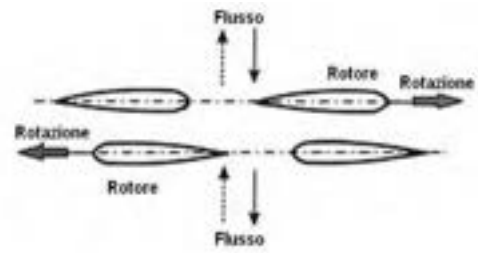
- rotore singolo con distributore, come nell'impianto Pico (v. fig. 23 - a);
- doppio rotore in serie a due piani, usato in Islay I (v. fig. 23 - b);
- due rotori controrotanti, usati in OSPREY e in LIMPET-Islay II (v. fig. 23 - c).



(a) con distributore (Pico)



(b) a due stadi



(c) a rotori controrotanti

Fig. 23– Varianti della turbina Wells

Tutte queste versioni sono state oggetto di considerevole ricerca e sviluppo; specialmente in Europa (UK, Portogallo, Irlanda), e in Giappone, India e Cina.

5.2.2 Turbina ad azione

L'alternativa alla turbina Wells più considerata è la turbina ad azione autorettificante. Il suo rotore è simile a quello di una turbina a vapore monostadio convenzionale di tipo assiale ad azione, cioè la classica turbina a vapore de Laval brevettata nel 1889. Affinché la turbina sia autorettificante, invece di un solo distributore, come nella turbina de Laval convenzionale, sono presenti due distributori, posti simmetricamente su entrambi i lati del rotore (v. fig. 24).



Fig. 24 - Turbina ad azione autorettificante

Una grossa limitazione nell'efficienza di questa turbina dipende dallo stallo aerodinamico nel distributore a valle. Gran parte della ricerca e sviluppo in questo tipo di turbine è stato condotto negli ultimi vent'anni in Giappone e in parte anche in India, Cina, Gran Bretagna e Irlanda [6].

Anche se le turbine ad azione a flusso assiale sono le più considerate, sono state studiate anche quelle a flusso radiale. Ci sono molte varianti di queste turbine, come mostrato nelle tabelle successive (v. fig. 25, tab. 3 e tab. 4).

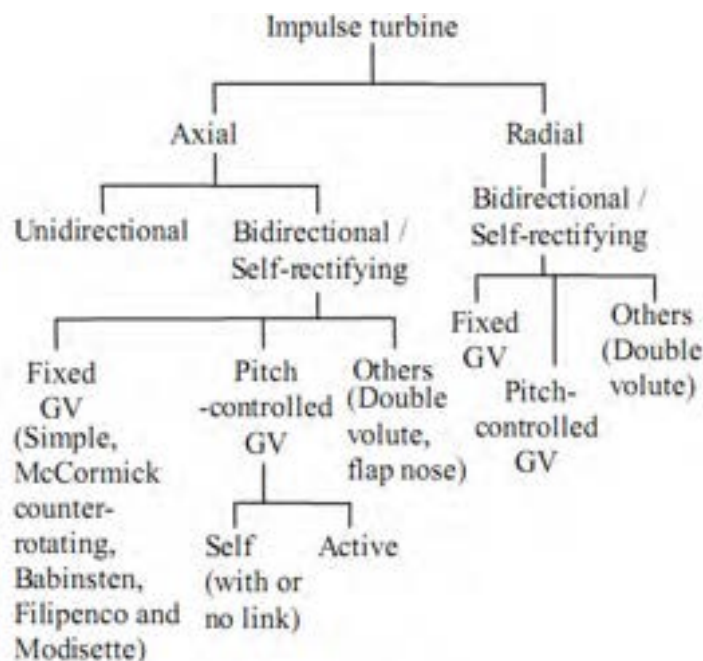


Fig. 25 – Classificazione delle turbine ad azione (fonte [8])

Tab. 3 – Confronto delle turbine assiali ad azione (fonte [8])

Type	Acceptable efficiency for an operating range	Significations
Simple unidirectional [8]	35-57% for the flow coefficient range of 0.2-0.9	Highest peak efficiency (57%) at the cost of flow rectification, $\theta = 20^\circ$ (optimum).
Self-rectifying with fixed GV [27, 37, 40 and 50]	35-38% for flow coefficients range of 0.8-2	Less operational costs, poorer performance, inferior to unidirectional turbine, optimum parameters: $\theta = 30^\circ$, $D = 0.6$, $H/T = 0.6$.
Self-rectifying with self-pitch-controlled GV [25, 42]	Around 30% efficiency for the flow coefficient range of 0.6-1.2	Better performance, optimum values: $\gamma = 60^\circ$, $S_g/l_g = 0.8$ (splitter), nearly 0.65 (mono-vane).
Self-rectifying with self-pitching linked GV [26]	30-52% efficiency for the flow coefficient range of 0.4-2.1	Best performance, improved peak efficiency than the turbine without link, complex and difficult to maintain.
Self-rectifying with active-pitch-controlled GV [30]	40-55% for the turbine speed range of 400-800 rpm	Higher efficiency in comparison with turbine with fixed GV, complex and expensive.

Tab. 4 – Confronto delle turbine radiali ad azione (fonte [8])

Type	Acceptable efficiency for an operating range	Significations
Self-rectifying with fixed GV [54, 55]	25-27% for the flow coefficient range of 0.6-1.2	Efficiency peaks at $\theta_o = \theta_i = 25^\circ$ (optimum), unfavorable diffuser action downstream of GV.
Self-rectifying with active-pitch- controlled GV [28, 57]	30-41% for the flow coefficient range of 0.6-2	10 % higher efficiency than fixed GV radial turbine at the expense of design complications and higher costs.

5.3 La turbina Denniss-Auld

La turbina Denniss-Auld è stata sviluppata dalla società australiana Oceanlinx; è una turbina auto rettificante a pale orientabili, che utilizza una velocità di rotazione più lenta con maggiore coppia, in modo da migliorare l'efficienza, l'affidabilità e ridurre le esigenze di manutenzione. Il suo principio di funzionamento è schematizzato in fig. 26.

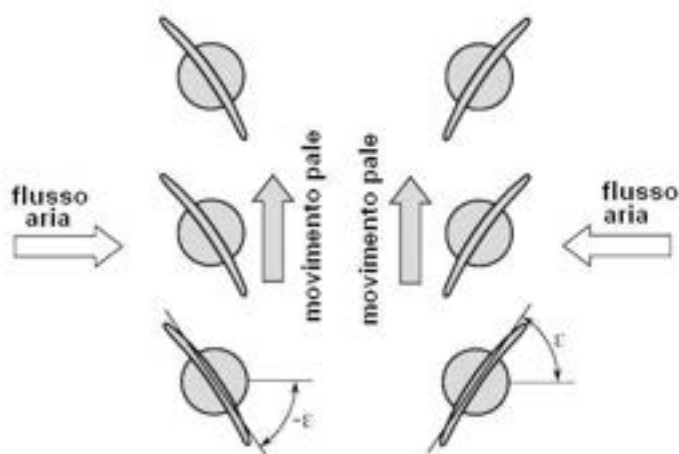


Fig. 26 – Principio di funzionamento della turbina a pale orientabili Denniss-Auld

L'orientamento delle pale è attuato da un servomeccanismo con controllore a logica programmabile (PLC), con sensore di pressione e trasduttore. In base all'aumento di pressione sul fondo del mare prodotto dall'onda in avvicinamento, vengono calcolati i parametri di funzionamento della turbina, in modo da ottimizzarne l'efficienza e conseguentemente vengono orientate le pale.

5.4 Rotore Savonius

Il rotore Savonius, inventato dall'ingegnere finlandese Savonius nel 1922, consiste in una turbina a flusso radiale auto-rettificante. Questo dispositivo è utilizzato nel campo dell'energia eolica per impianti di basso costo. Essendo un dispositivo a resistenza aerodinamica, la forza del vento viene sfruttata meno efficacemente rispetto ad altri tipi di turbina, ma ha il vantaggio di una costruzione piuttosto semplice nella sua versione base (v. fig. 27).

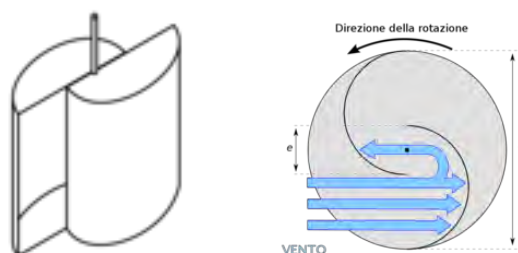


Fig. 27 - Turbina Savonius nella sua forma più semplice

Il rotore Savonius prende avvio con deboli velocità di vento e presenta una coppia di torsione elevata, sebbene variabile in modo sinusoidale nel corso della rotazione. Le versioni più evolute hanno pale elicoidali capaci di omogeneizzare la coppia di torsione. Gli aspetti positivi e negativi di questa macchina sono riepilogati nella tabella 5.

Tab. 5 – Vantaggi e svantaggi del rotore Savonius nella forma semplice

Vantaggi	Svantaggi
Poco costosa	Basso rendimento
Poco ingombrante	Coppia incostante
Poco rumorosa	
Si avvia con poco flusso d'aria	
Coppia elevata all'avviamento	

L'applicazione della turbina Savonius nel campo dei sistemi OWC è in fase di studio. Rispetto alle turbine Wells, le turbine basate sul principio del rotore Savonius, hanno rendimenti minori, tuttavia potrebbero rappresentare una valida opzione per le situazioni caratterizzate da basso numero di Reynolds, campo in cui le turbine Wells presentano difficoltà di funzionamento.

In fig. 28 è schematizzato un rotore Savonius a 5 pale, adatto per dispositivi OWC [5].



Fig. 28 - Esempio di rotore Savonius a 5 pale per dispositivo OWC

In fig. 29 è schematizzato un dispositivo OWC con turbina basata sul principio del rotore Savonius. Si osserva che la geometria del condotto è ottimizzata per sfruttare le caratteristiche di funzionamento del rotore Savonius [5].

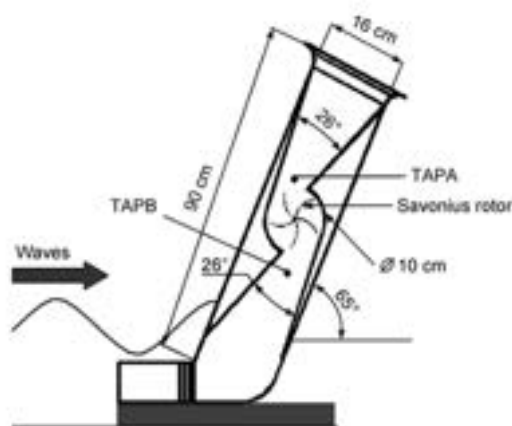


Fig. 29 – Schema di OWC con rotore Savonius

5.5 Confronto tra turbine Wells e turbine ad azione

Volendo fare un confronto tra turbina Wells e turbina ad azione autorettificante, non è del tutto chiaro quale sia migliore per efficienza, costi, rumorosità, dimensioni ed altro, considerando anche che di ognuna di esse vi sono più versioni di diversa complessità e costo.

Un tipo di turbina può diventare preferibile rispetto alle altre anche in base alle caratteristiche climatiche del luogo e quindi alla quantità di energia nelle onde. Per esempio la turbina ad azione per la sua minore velocità di rotazione è meno limitata da stallo e da sollecitazioni e può essere vantaggiosa in ambiente con onde molto intense.

Inoltre le caratteristiche geometriche del dispositivo OWC hanno effetto sull'efficienza della turbina. Da considerare è anche l'effetto dell'insieme OWC-turbina sulle caratteristiche di risonanza del dispositivo, pertanto occorre particolare attenzione nell'accoppiamento tra OWC e turbina. [9]

5.6 Riferimenti dei principali studi sulle turbine per dispositivi OWC

Da quanto esposto, la turbina rappresenta uno degli elementi chiave della tecnologia OWC; molti lavori teorici e sperimentali puntano ad approfondire questa tematica ma ancora non sono emerse soluzioni del tutto soddisfacenti. A titolo di esempio vengono citati alcuni lavori rilevanti.

Tra i principali studi per dispositivi OWC occorre considerare innanzitutto il lavoro di Corsini e Rispoli dell'Università La Sapienza di Roma [rif. 17] per lo sviluppo di un modello analitico e numerico, da implementare nel programma TRANSYS, per la simulazione in transitorio della catena di conversione energetica, dalle onde all'energia elettrica, nei dispositivi OWC.

Il lavoro di Takao e Setoguchi del 2012 [rif. 7] descrive lo stato dell'arte delle turbine utilizzabili nella conversione di energia dalle onde. Sono considerate le turbine di tipo Wells, le turbine ad azione, le turbine ad azione radiali, la turbina cross-flow e la turbina Savonius. Le caratteristiche delle turbine sono valutate in condizione di onde irregolari, tipica del mare, tramite simulazione numerica e prove sperimentali in mare. Viene anche proposto un nuovo tipo di turbina ad azione.

Altro importante riferimento è il programma di ricerca POSEIDONE [rif. 18] in cui si sviluppa un concetto di turbina Wells adatta per condizioni d'onde a bassa energia tipiche del Mediterraneo. Le problematiche di progettazione affrontate in questo programma riguardano l'ottimizzazione della coppia a bassa portata, la

resistenza allo stallo, le dimensioni compatte, l'alta velocità di rotazione e l'estensione delle condizioni di funzionamento. Il prototipo della turbina è schematizzato in fig. 30.

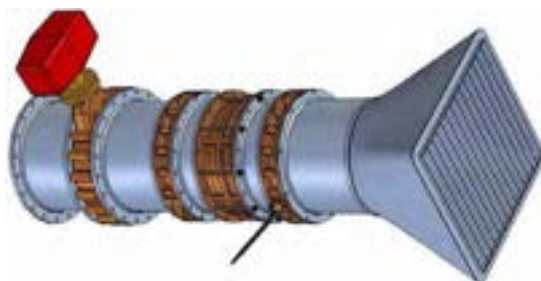
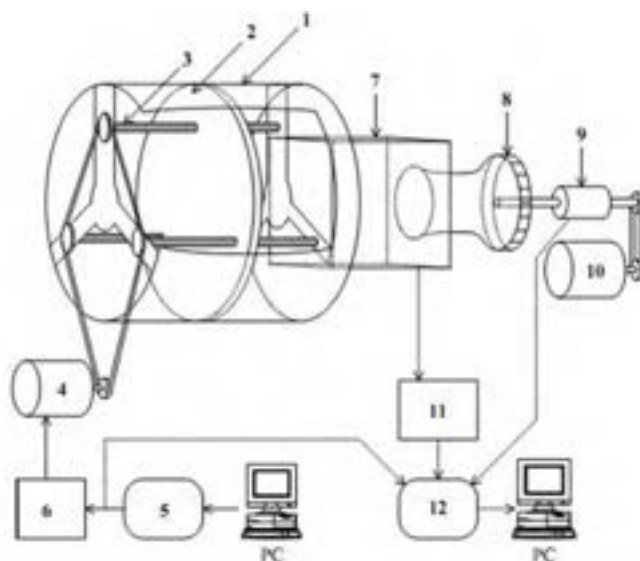


Fig. 30 – Turbina innovativa del progetto POSEIDONE

Diverse sono le pubblicazioni specifiche sulle turbine Wells, in particolare:

- Gato, de O. Falcão che ne trattano la teoria [rif. 12] e l'aerodinamica [rif. 13];
- Inoue et al. [rif. 14] che studiano il rendimento della turbina sia dal punto di vista teorico che sperimentale per determinare un metodo ottimale di progettazione della turbina in condizione irregolare di onde;
- il documento di Raghunathan [rif. 16], in cui sono rivisti i metodi di predizione disponibili e i parametri che controllano la prestazione aerodinamica, è trattata la prestazione alla partenza della turbina e infine sono proposte alcune tecniche per migliorare il rendimento;
- lo studio di Curran e Gato [rif. 21], che confronta le prestazioni di diversi tipi di turbine Wells a piano singolo e a più piani. In questo lavoro sono misurate e quantificate le perdite aerodinamiche (Swirl Energy) e sono proposti due metodi di recupero di energia.

Il lavoro di Takao et al. del 2004 [rif. 25] invece si riferisce allo studio di una turbina radiale ad alte prestazioni per WEC, con distributore ad alette regolabili (*pitch-controlled guide vanes*). Lo studio si basa su prove sperimentali su modello in condizioni di flusso regolare e mostra che nelle condizioni esaminate questo tipo di turbina ha prestazioni superiori rispetto alla turbina radiale convenzionale con alette fisse. L'apparato sperimentale utilizzato è schematizzato in fig. 31.



1 Galleria del vento 2 Pistone 3 Ball-screw 4 Servomotore 5 Inverter 6 Servo-pack 7 Camera di settling 8 Turbina radiale 9 Trasduttore di coppia 10 Servomotore-generatore 11 Trasduttore di pressione 12 Raddrizzatore

Fig. 31 - Apparato sperimentale del rif. 25

È importante, anche se in corso di completamento, il lavoro di Lopez et al. del 2012 [rif. 9] sull'accoppiamento tra turbina e camera OWC. Il fenomeno è studiato tramite una combinazione di modellizzazione numerica e sperimentazione in scala con l'apparato in fig. 32.



Fig. 32 - Apparato sperimentale (sinistra) e modello OWC (centro e destra) del rif. 9

Nonostante il notevole impegno di studio e sperimentazione, rimangono ancora diversi aspetti da approfondire.

Caratteristiche dell'apparato U-OWC

L'Università Mediterranea di Reggio Calabria da molti anni svolge studi e ricerche sui dispositivi basati sul principio della colonna d'acqua oscillante [rif. 26]. Sono stati sviluppati e brevettati diversi dispositivi innovativi, con il duplice scopo di assorbire l'energia delle onde e di generare energia elettrica. L'assorbimento di energia delle onde consente di attenuare l'impatto sulla costa.

Un primo dispositivo, denominato REWEC1 è di tipo completamente sommerso, è costituito da un cassone con un condotto verticale di ingresso ed un cuscino d'aria in pressione nella parte superiore (v. fig 33). In funzione della pressione dell'aria nel cuscino varia la frequenza propria di oscillazione della colonna d'acqua e quando questa frequenza è prossima a quella delle onde, viene assorbita energia con attenuazione del

moto ondoso. La generazione di energia elettrica avviene mediante una turbina idraulica nel condotto verticale.

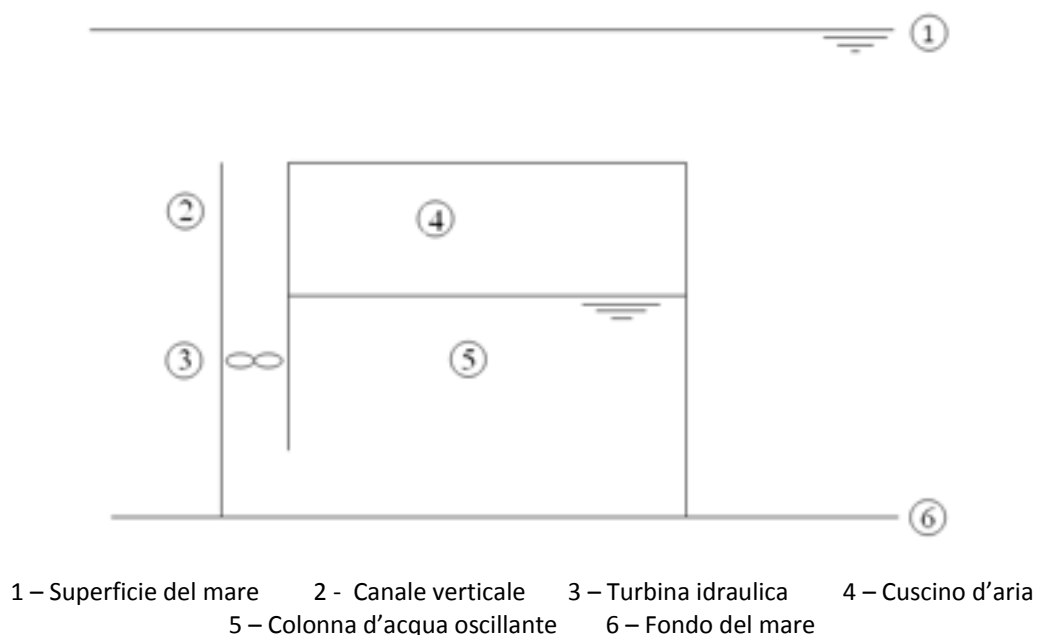


Fig. 33 – Schema di principio del dispositivo REWEC1

Un secondo dispositivo denominato REVEC2 (v. fig. 34) emerge parzialmente dall'acqua, inoltre il cuscino d'aria è collegato a serbatoi d'aria compressa mediante un condotto in cui è inserita la turbina ad aria, con una valvola di regolazione con cui controllare accuratamente la frequenza propria di oscillazione al variare della frequenza delle onde. Il posizionamento della turbina fuori dall'acqua marina la espone meno alla corrosione e ne agevola la manutenzione.

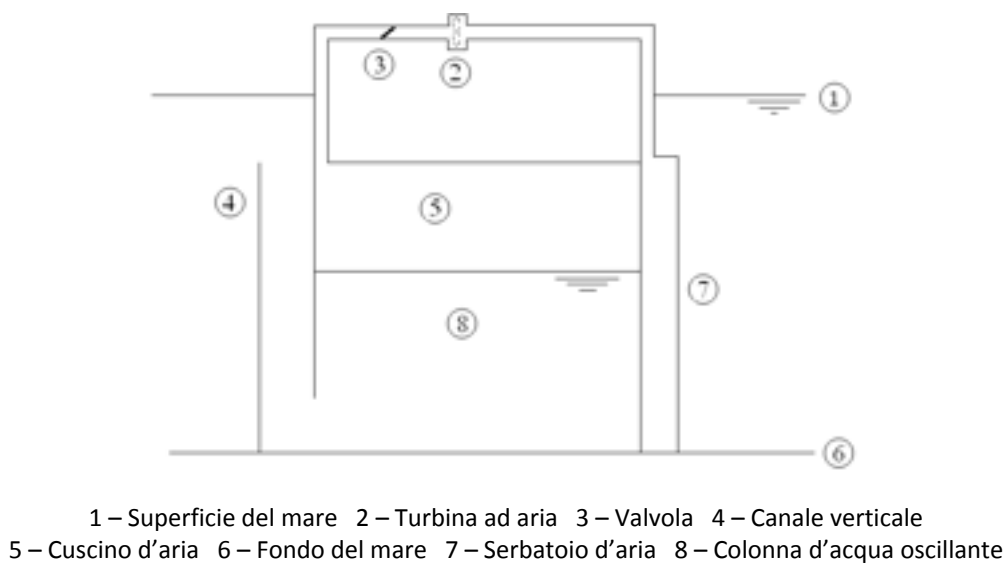


Fig. 34 – Schema di principio del dispositivo REWEC2

Il dispositivo denominato REWEC3 si basa sul principio U-OWC, che rappresenta una evoluzione dei sistemi OWC e rispetto ad essi presenta migliore efficienza in termini di assorbimento di energia e risulta più adatto alle condizioni di moto ondoso che si verificano sulle coste italiane.

Il cassone del dispositivo U-OWC è costituito da un condotto verticale nella parte anteriore, interagente con il moto ondoso incidente attraverso un'imboccatura superiore (v. fig. 35). Tale condotto è poi collegato ad una camera di assorbimento attraverso una luce di fondo. La camera di assorbimento contiene la colonna d'acqua nella parte inferiore e il cuscino d'aria nella parte superiore. Il cuscino d'aria è in contatto con l'atmosfera attraverso il condotto con la turbina.

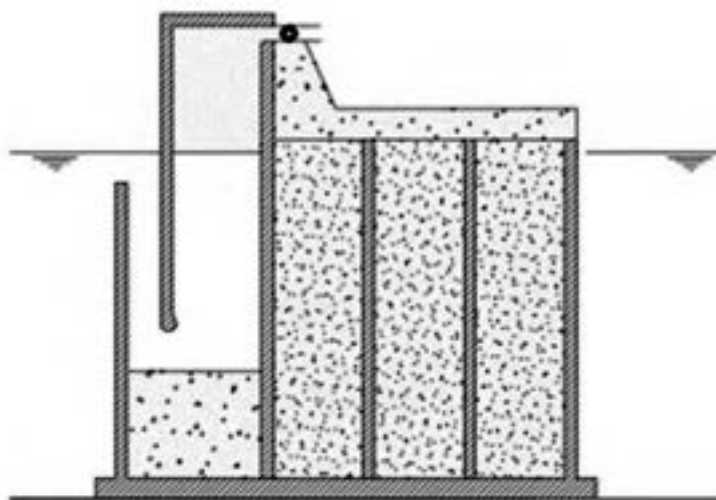


Fig. 35 – Schema del dispositivo U-OWC

Nel dispositivo U-OWC, a differenza dei classici OWC, le onde non entrano direttamente nella struttura ma agiscono da forzante esterna per instaurare il moto di compressione e decompressione del cuscino d'aria. Il regime idrodinamico è significativamente differente e risulta un funzionamento più regolare nelle diverse condizioni di mare con migliore efficienza.

Dal punto di vista tecnologico gli impianti U-OWC non presentano addizionali e significative complessità costruttive rispetto a quelle di una classica diga foranea a parete verticale. La struttura dell'impianto, infatti, è essenzialmente quella classica delle dighe a cassoni cellulari in calcestruzzo armato, largamente utilizzati per la costruzione dei porti e delle opere di difesa delle coste. Normalmente le celle sono zavorrate con inerti o calcestruzzo, mentre in questo dispositivo è presente una camera frontale vuota in collegamento con il mare nella parte inferiore e con l'atmosfera nella parte superiore.

Il dispositivo REWEC3 risulta particolarmente interessante in termini di costo di impianto, nei casi in cui sia già prevista la costruzione di un porto con cassoni frangiflutti, in quanto il costo aggiuntivo è marginale. Inoltre in termini di operatività e di efficienza, il dispositivo risulta competitivo rispetto ad altri sistemi OWC nelle diverse condizioni di mare.

Il dispositivo REWEC3 è in fase di sperimentazione su scala ridotta presso il Laboratorio marino dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria (v. fig. 36).



Fig. 36 – Laboratorio marino dell’Università Mediterranea di Reggio Calabria

Per la sperimentazione in scala ridotta verrà utilizzato un apparato con basamento in cemento (v. fig. 37) e cassone in acciaio in fase di realizzazione.

Su questo apparato l’ENEA sta sviluppando un modello fluidodinamico CFD in 3 dimensioni per la simulazione numerica e l’ottimizzazione della geometria; la struttura geometrica e le caratteristiche fluidodinamiche di questo dispositivo sperimentale sono ampiamente descritte nel relativo rapporto [rif. 27).

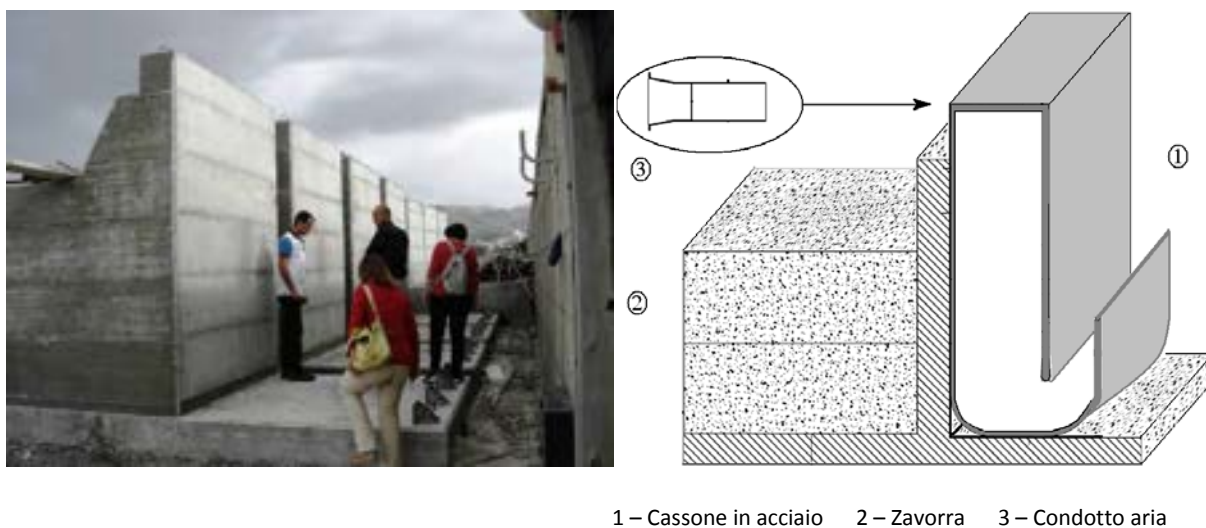


Fig. 37 – Basamento dell'apparato sperimentale

Un prototipo a piena scala è in corso di costruzione da parte della società Wavenergy.it S.r.l. nella nuova darsena di Civitavecchia (v. fig. 38). Avrà un fronte di 650 metri, una potenza elettrica installata stimabile in circa 650 kW e una produzione annuale stimabile in circa 750 MWh.



Fig. 38 - Costruzione del dispositivo REWEC3 nella nuova darsena di Civitavecchia

Inoltre sono stati elaborati progetti per l'inserimento di questi dispositivi in diverse località tra cui Gioia Tauro, Bagnara Calabria, Genova e altre località della costa tirrenica, della costa jonica e anche dell'oceano Pacifico.

6 Conclusioni

L'ambiente marino, attraverso lo sviluppo di nuove tecnologie ad esso legate, offre grosse opportunità per il sistema produttivo italiano, sia dal punto di vista del potenziale di utilizzazione per la produzione di energia, sia come opportunità di esportazione di prodotti e tecnologie verso i Paesi che si affacciano sul Mediterraneo, con condizioni comparabili con quelle delle coste italiane.

Le tecnologie OWC, ed in particolare le U-OWC, presentano un grosso potenziale applicativo grazie alla loro flessibilità operativa e alla possibilità di integrarsi con le opere portuali e di difesa delle coste; possono quindi rappresentare, in prospettiva, un significativo fattore di rilancio per l'economia nazionale.

Nel settore delle tecnologie OWC sono stati fatti notevoli progressi; il dispositivo REWEC3 rappresenta certamente una punta avanzata della ricerca italiana, anche se rimangono diversi aspetti da approfondire, soprattutto per quanto riguarda i dispositivi di estrazione dell'energia dal flusso d'aria. Le soluzioni già provate, basate essenzialmente sul concetto di turbina Wells, appaiono non completamente soddisfacenti e diverse soluzioni alternative meritano di essere approfondite ed eventualmente sviluppate.

L'ENEA può avere un ruolo importante in questi sviluppi grazie alle sue competenze scientifiche e alle capacità tecniche nello sviluppo di modelli computazionali e analisi fluidodinamiche. Inoltre può costituire un importante punto di riferimento in questo settore grazie alle sue consolidate collaborazioni con il mondo accademico e con il contesto produttivo industriale.

7 Riferimenti bibliografici

1. Barbara Zanuttigh, Elisa Angelelli, "Analisi delle attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento della energia marina dai mari italiani" Report RdS/2011/72
2. Paolo Monti, Giovanni Leuzzi, "Analisi delle attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento della energia marina da correnti marine" Report RdS/2011/148
3. Esmeralda Tuccimei, "Colonne d'acqua oscillanti come risorsa energetica costiera" GEOmedia n°6-2011
4. B. Drew, A. R. Plummer, M. N. Sahinkaya (Department of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath, UK), "A review of wave energy converter technology" Proc. IMechE Vol. 223 Part A: J. Power and Energy, Proc. IMechE Vol. 223 Part A: J. Power and Energy
5. Sandeep K PATEL, Krishnil RAM, M. Rafiuddin AHMED & Young-Ho LEE, "Performance studies on an oscillating water column employing a Savonius rotor" 2011
6. Antonio F. de O. Falcao, "Wave Energy utilization: A review of the technologies" Renewable and sustainable Energy Reviews 14 (2010) 899-918
7. M. Takao, T. Setoguchi "Air Turbines for Wave Energy Conversion" 2012
8. A. Salam, P. Dudhgaonkar, A. Samad "Impulse turbines for oscillating water column based energy device - a review" 2013
9. I. Lopez, G. Iglesias, M. Lopez, F. Castro and M.A. Rodríguez "Turbine-chamber coupling in an owc wave energy converter" 2012
10. The Carbon Trust "Marine Energy Challenge - Oscillating Water Column Wave Energy Converter" Evaluation Report, 2005 - <http://www.carbontrust.com>
11. T. Setoguchi, S.Santhakumar, H.Maeda, M. Takao, K.Kaneko, "A review of impulse turbines for wave energy conversion" 2000
12. L. M. C. Gato, A. F. de O. Falcão, "On the Theory of the Wells Turbine" 1984
13. L. M. C. Gato, A. F. de O. Falcão, "Aerodynamics of the Wells turbine" 1988
14. M. Inoue, K. Kaneko, T. Setoguchi, T. Saruwatari, "Studies on the Wells Turbine for Wave Power Generator" 1988
15. A. F. de O. Falcão, "The shoreline OWC wave power plant at the Azores" 2000
16. S. Raghunathan, "The Wells air turbine for wave energy conversion" 1995
17. A. Corsini, F. Rispoli, "Modeling of wave energy conversion with an Oscillating Water Column device"
18. M. Bassetti, A. Corsini, G. Delibra, F. Rispoli, E. Tuccimei, P. Venturini, (Università di Roma)
19. G. Faggiolati, S. Piccinini, G. Romani, M. Ruggeri, (Faggiolati Pumps S.p.A.)

20. F. Arena, P. Boccotti, S. Meduri, A. Romolo, (Università Mediterranea di Reggio Calabria) "Development of a wave energy converter for Mediterranean operation" 2013
21. R. Curran, L. M. C. Gato, "The energy conversion performance of several types of Wells turbine designs" 1996
22. A. Fleming, I. Penesis, L. Goldsworthy, G. Macfarlane, N. Bose, T. Denniss, "Phase Averaged Flow Analysis in an Oscillating Water Column Wave Energy Converter" 2013
23. R. Vertechy, M. Fontana, G.P. Rosati Papini, M. Bergamasco, "Oscillating-water-column wave-energy-converter based on dielectric elastomer generator"
24. M. Folley, T. Whittaker, "Validating a Spectral-domain Model of an OWC using Physical Model Data"
25. M. Takao , Y. Fujioka , H. Ito and T. Setoguchi, "Radial Turbine with Pitch-Controlled Guide Vanes for Wave Energy Conversion" 2004
26. P. Boccolotti " Gli impianti REWEC" Editoriale BIOS 2004
27. D. Nicolini et al. "Sviluppo di un modello numerico per simulazioni CFD di sistemi di conversione del moto ondoso tipo U-OWC (Oscillating Water Column)" Rapporto ENEA in preparazione (2013)