



Università di Padova - Dipartimento I.M.A.G.E.

Il presente lavoro è articolato su una diverse serie di prove su modello fisico per ottenere un sufficiente numero di dati informazioni utili a caratterizzare la capacità del dispositivo SeaBreath di convertire energia ondosa in energia elettrica.

Per cogliere appieno i meccanismi di funzionamento del convertitore di energia, sono stati esaminati due modelli semplificati rispetto al prototipo. In un caso si è voluto esaminare l'andamento della superficie libera dentro alle camere (Capitolo 5), nell'altro la effettiva capacità di produrre energia in condizioni di onda regolare (Capitolo 6) ed irregolare (Capitolo 7). Al fine di eliminare l'aleatorietà connessa alla dinamica del galleggiamento, è stato esaminato solo un dispositivo fisso su pali e non galleggiante. Il dispositivo fisso risulta generalmente meno efficiente per onde corte e più efficiente per onde lunghe rispetto ad un dispositivo galleggiante ben dimensionato.

Ciò ha permesso di interpretare più efficacemente il funzionamento del dispositivo, come riportato in calce ai risultati sperimentali, e di sviluppare modelli tesi ad evidenziarne le potenzialità (Modello allegato).

I risultati sperimentali hanno dimostrato che il numero di celle e la dimensione delle stesse potrebbe essere utilmente commisurato alla lunghezza della minima onda di cui si vuole convertire l'energia: la camera non deve essere più corta di 4 volte tale lunghezza d'onda.

Il numero di camere, 4, e di conseguenza la lunghezza complessiva del Seabreath è probabilmente già ottimizzato, dato che l'energia presente nella quarta camera è ancora abbondante (quindi il Seabreath non è inutilmente lungo) ma è inferiore all'onda presente nella terza camera (quindi una quinta camera, con annesse valvole potrebbe non essere economica). Al massimo sarebbe utile avere dei setti intermedi, la cui complessità comporterebbe però troppi svantaggi in fase di realizzazione.

Le prove senza simulatore di turbina (Fase 1) hanno consentito di costruire un semplice modello empirico della forzante ondosa per il Sea Breath. Le prove con simulatore di turbina hanno dimostrato senza ombra di dubbio che il SeaBreath è

in grado di convertire energia ondosa sia in condizioni di onde regolari (Fase 2) che per mare reale (Fase 3). L'efficienza dipende in gran parte dal periodo delle onde incidenti. Il valore misurato, che rimane dell'ordine del 10% dell'energia incidente, non rende però conto delle reali potenzialità: l'interpretazione del funzionamento ha portato a ritenere che la dimensione dei condotti dell'aria sia molto sottodimensionata, e che ciò abbia grandemente limitato il flusso d'aria realmente convogliato alla turbina e, di conseguenza, l'energia convertita.

Al variare della scala si assume che l'efficienza, ovvero il rendimento, non cambi.

La potenza prodotta è proporzionale alla scala delle lunghezze elevata alla 3.5.

Il risultato di 0.7 W mediamente prodotti in laboratorio per onda regolare di 6 cm e periodo T da 1.2 a 1.8 s equivalgono a 25 kW su un modello 20 volte maggiore (largo 6 m e lungo 30, soggetto ad un onda regolare di 1.2 m, $T=5.3-8$ s) e 1.6 MW ad una scala 66 volte maggiore (20 x 100 m soggetto ad un onda regolare di 4 m, $T=9-14$ s). Questo valore non tiene conto delle perdite dovuto al rendimento della turbina, alla conversione in energia alla frequenza di rete ed al trasferimento dell'energia a riva. Peraltro le perdite sulla turbina sono molto inferiori in confronto ad altri sistemi, grazie al meccanismo di valvole tese ad uniformare il flusso di aria.

La produzione complessiva annua dipende dal clima complessivo e va valutato per onde irregolari. Nel passaggio da onda regolare ad irregolare si è visto un peggioramento del funzionamento in termini di potenza utile al turbina dell'ordine del 50%, come tipicamente si osserva in tutti i sistemi.

In questo lavoro è stata valutata l'efficienza del sistema a dalle onde alla turbina, e tale efficienza è espressa nei capitoli 6-8 in termini di larghezza di cattura: è la larghezza ipotetica del fronte d'onda di cui posso assorbire tutta l'energia.

MODELLO SEMI EMPIRICO

MODELLO APERTO

Di interesse sostanziale per il funzionamento del Sea Breath è la valutazione dell'onda nella camera, la cui altezza è indicata con H_j per la camera j -esima.

La base di partenza per questo tipo di analisi è stata la ricostruzione istantanea del profilo liquido nelle camere attraverso un'interpolazione polinomiale spaziale dei segnali nel tempo delle quattro sonde interne.

In forza del teorema di Fourier (Bracewell, 2000), si sono scomposte in termini armonici i profili liquidi ricavati dai dati acquisiti dalle sonde. L'onda reale che si manifesta all'interno della camera di oscillazione può essere espressa come somma di armoniche, opportunamente combinate tra loro. In termini generali possiamo affermare che:

$$\eta_n = a_{0,n} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \sum_{j=1}^{\infty} a_{j,n} \cos(k_j x) \sin(\omega_j t + \varphi_j) \quad \text{Eq. 1}$$

Con le opportune posizioni, la Eq. consente di scrivere un sistema lineare di 4 equazioni in 4 incognite, ricavando così le ampiezze delle armoniche che compongono il moto. Dettagli sul procedimento sono consultabili nel lavoro di Canale (Canale, 2010).

Essendo H_i l'altezza dell'onda incidente, si definisce coefficiente di cattura per la camera j -esima il seguente rapporto adimensionale:

$$\tau_j = \frac{2a_{0,j}}{H_i} \quad \text{Eq. 2}$$

che rappresenta quanta parte dell'altezza d'onda incidente è presente all'interno della camera j -esima.

MODELLO CON PTO

Nella seconda fase di lavoro si sono misurati le pressioni che si sviluppano all'interno delle singole camere. Da queste misure si sono desunte le altezze di pressione medie Π_j che si sviluppano all'interno della camera j -esima. Queste corrispondono alle altezze medie (efficaci in termini di spostamento dei volumi d'aria) delle oscillazioni di pressione che si propagano nelle condotte di mandata e aspirazione.

Essendo ancora H_i l'altezza dell'onda incidente, e indicando con γ_w il peso specifico dell'acqua, si definisce coefficiente di cattura per la camera j -esima il seguente rapporto adimensionale:

$$\tau_j = \frac{\Pi_j}{\gamma_w H_i} \quad \text{Eq. 3}$$

che rappresenta quanta parte dell'onda incidente, presente all'interno della camera j -esima, è di fatto utile alla variazione di volume.

MODELLO SEMI EMPIRICO

Si introducono tutte le variabili in forma adimensionale, opportunamente scalate. Per i tempi e le lunghezze si utilizzeranno rispettivamente frequenza e numero d'onda come variabili scala, perciò, essendo l la lunghezza della camera:

$$\begin{aligned}\hat{t} &= \omega t \\ \hat{x} &= kx \\ \hat{l} &= kl\end{aligned}\tag{Eq. 4}$$

Poiché le misure di pressione sono date in metri di colonna d'acqua, nota l'altezza dell'onda incidente H_i , si fissa per la j -esima camera:

$$\hat{p}_j = \frac{p_j}{\gamma_w H_i}\tag{Eq. 5}$$

Riferendosi al segnale della prima camera (lato mare), le successive mostreranno uno sfasamento che si identifica con

$$\varphi_j = (j-1)\omega \frac{l}{c} = (j-1)\hat{l}\tag{Eq. 6}$$

Essendo $c=\omega/k$ la celerità di propagazione dell'onda incidente. Si noti che si sono considerate camere adiacenti e della medesima lunghezza. Pertanto, senza perdere in generalità, in corrispondenza della perturbazione incidente:

$$\eta_i = \cos(\hat{t} - \hat{x} + \varphi)\tag{Eq. 7}$$

Nella j -esima camera si instaura un'oscillazione principale

$$\hat{p}_j = \frac{1}{2} \tau_j \sin(\hat{t} - \varphi_j)\tag{Eq. 8}$$

Con i dati desunti dalle prove su modello compatto, si sono ricostruite quattro leggi analitiche (una per camera) che stimano i coefficienti di cattura τ_j . L'aria all'interno dei condotti viene ipotizzata incompressibile. Pertanto la propagazione dell'onda di pressione elementare all'interno dei condotti viaggia con una celerità enorme rispetto a quella dell'onda in acqua. Ciò detto la traduzione dei fenomeni pressori nei condotti è intesa istantanea rispetto alla scala dei tempi adottata. Segue che nel condotto di mandata la pressione p_{SUP} si identifica con l'involuppo superiore dei segnali di pressione delle camere. Inoltre, per effetto della presenza della valvola in comunicazione con l'ambiente esterno, tale pressione non potrà mai scendere al di sotto di quella atmosferica (valore nullo di riferimento).

$$\hat{p}_{SUP}(\hat{t}) = \max\{\hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_N, 0\}\tag{Eq. 9}$$

Stesso ragionamento può essere fatto per il condotto di aspirazione.

$$\hat{p}_{INF}(\hat{t}) = \min\{\hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_N, 0\}\tag{Eq. 10}$$

Il carico disponibile all'utilizzazione sarà, nel tempo, pari alla differenza di carico tra mandata e aspirazione, ossia:

$$\Delta p_{SB} = p_{SUP} - p_{INF}$$

Eq.
11

Pertanto il rendimento energetico può essere stimato

$$\kappa_{SB} = \langle \hat{p}_{SUP} - \hat{p}_{INF} \rangle$$

Eq.
12

VALIDAZIONE

Con i dati dei valori medi del rendimento energetico ricavati dalla Errore: sorgente del riferimento non trovata si è validato il modello semi empirico descritto sopra e basato su una stima dei coefficienti di cattura (Figura A. 10 .1). In forza degli esiti positivi di tale confronto si crede questo modello utile a valutare tutte le altre grandezze in gioco, nonché ad una estensione per la stima delle potenze producibili su prototipo.

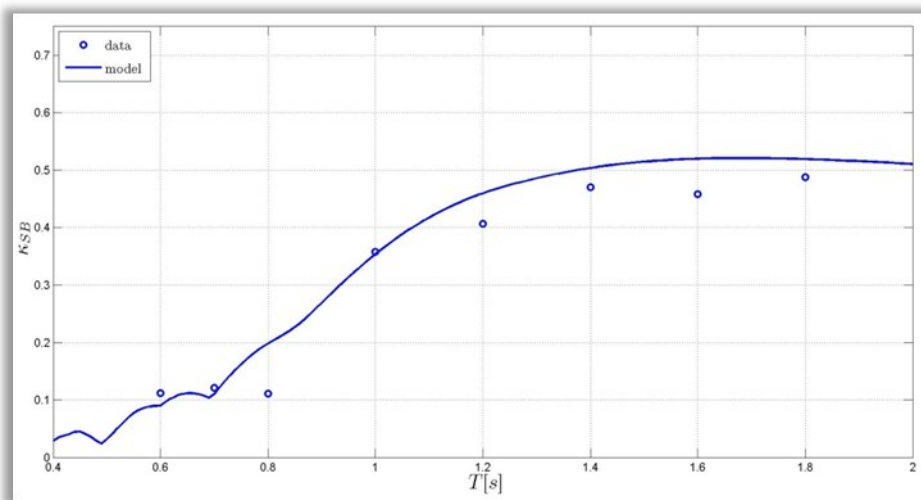


Figura A.10.1 - Modello semi empirico del rendimento energetico del SeaBreath. Confronto coi dati sperimentali.

ESEMPI DI APPLICAZIONE

SCALA DEI RISULTATI

I risultati sono proposti a due scale diverse: quella di un dispositivo di lunghezza 100 m, e quella di un dispositivo lungo 30 m. Il primo avrebbe un peso di

APPLICAZIONE CAGLIARI

0.1.1 CLIMA ONDOSI

In Tabella 1 .1 si riporta una statistica rappresentativa del clima ondoso al largo di Cagliari. I dati sono relativi all'anno medio. A ciascuna condizione di mare, contraddistinta da un'altezza significativa (H_s) ed un periodo di picco (T_p), è associata una probabilità di accadimento.

Nell'ultima colonna è data inoltre la potenza disponibile per unità di larghezza del fronte d'onda, calcolata come potenza associata alla coppia H_S-T_P e moltiplicata per la relativa probabilità di accadimento.

Tabella 1.1 - Cagliari. Clima ondoso caratteristico al largo della costa. Si indica inoltre la potenza disponibile per unità di larghezza del fronte d'onda. I dati sono riferiti all'anno medio.

WAVE N°	H_S [m]	T_P [s]	Prob. [%]	P_{DISP} [W/m]
calma	>0.5	-	19.2	-
1	0.75	4.8	24.3	273
2	0.75	8.1	8.3	166
3	1.38	4.8	12.2	463
4	1.38	7.0	9.6	537
5	1.38	9.2	4.9	397
6	2.30	6.7	10.1	1508
7	2.30	9.6	5.3	1260
8	3.50	8.5	2.9	1349
9	3.50	10.8	1.1	709
10	4.50	10.2	1.5	1484
11	6.13	10.7	0.6	1177
			100	9324

0.1.2 PROGETTO DEL SEABREATH

Il criterio di progettazione non è univoco. Progettare secondo le onde più piccole e più probabili significa dimensionare strutture più esili ed economiche che potrebbero beneficiare positivamente degli stati di mare con periodi corti ma che, di fronte ad altezze d'onda rilevanti, potrebbe subire danni.

Progettare secondo le onde più alte consente di sfruttare stati ondosi con potenze maggiori, seppure raramente disponibili, porta a dimensionare strutture ben più imponenti e costose, in grado di sopportare eventuali eventi estremi. Purtroppo anche un dispositivo imponente non riesce a sfruttare tutta la potenza annuale disponibile, risultando meno efficace in condizioni di onde con periodi più brevi e più probabili.

Si assume di seguito che, nella traduzione da modello a prototipo di tutti gli effetti scala siano trascurabili. Ferme restando le riserve in termini di comportamento su prototipo del fluido aeriforme, di seguito si danno le proiezioni di potenze e larghezze di cattura sulla base dei risultati fin qui esposti per un modello (scala 1:20) ed un prototipo (scala 1.66).

Si assume il modello nella configurazione attuale, quindi con un'efficienza ridotta a causa della modesta sezione dei condotti. Si assume come efficienza quello del modello irregolare, quindi con una resa del 50% rispetto al caso con onda regolare. Come carico del PTO si assume il valore a tubi corti.

Si propone l'installazione di un modello su un pontile fisso in mare, con caratteristiche in scala 20:1 rispetto al modello studiato in laboratorio. Poiché le grandezze lineari scalano con il fattore di scala, si deduce che il modello per lo studio in mare dovrà essere lungo 30 m, largo 6 m e presentare un'altezza di 5 m, di cui 2 m immersi.

Il prototipo pensato dal committente è lungo 100 m, largo 20 m presentare un'altezza di circa 16.5 m, di cui circa 6.5 m immersi. Rispetto a questo, il modello studiato in laboratorio è costruito in scala 1:66 (precisamente sarebbe 3:200).

0.1.3 RENDIMENTO ATTESO

La larghezza di cattura (CW) è funzione in primo luogo del periodo come ampiamente verificato dalle prove sperimentali, e in parte dell'altezza d'onda. Per esempio, onde molto maggiori dell'altezza della camera non possono fornire energia.

Carico ottimale L=30 m			
T[s] Onda regolare	CW [m] Onda regolare	Tp[s] Onda irregolare	CW [m] Onda irregolare
3.1	0.00	3.1	0.00
3.6	0.00	3.6	0.00
4.5	1.05	4.5	0.24
5.4	1.07	5.4	0.48
6.3	1.04	6.3	0.48
7.2	0.84	7.2	0.42
8.0	0.79	8.0	0.39

Carico ottimale L=100 m			
T[s] Onda regolare	CW [m] Onda regolare	Tp[s] Onda irregolare	CW [m] Onda irregolare
4.8	0.00	4.8	0.00
5.7	0.00	5.7	0.00
6.5	0.00	6.5	0.00
8.1	3.47	8.1	0.78
9.7	3.54	9.7	1.59
11.4	3.44	11.4	1.57

13.0	2.79	13.0	1.37
14.6	2.62	14.6	1.29

L'applicazione di questi valori al clima ondoso medio fornisce le seguenti tabelle.

L=100 m				
WAVE N°		P _{DISP} [W/m]	Capture Width [m]	P _{GENERATA} [W]
calma		-		
1	4.8	273	0.00	0
2	8.1	166	0.77	128
3	4.8	463	0.00	0
4	7	537	0.24	129
5	9.2	397	1.31	522
6	6.7	1508	0.10	146
7	9.6	1260	1.51	1906
8	8.5	1349	0.97	1306
9	10.8	709	1.58	1118
10	10.2	1484	1.58	2349
11	10.7	1177	1.58	1858
		9324		9461

L=30 m				
WAVE N°		P _{DISP} [W/m]	Capture Width [m]	P _{GENERATA} [W]
calma		-		
1	4.8	273	0.33	89
2	8.1	166	0.39	65
3	4.8	463	0.33	151
4	7	537	0.43	229
5	9.2	397	0.39	155
6	6.7	1508	0.45	673
7	9.6	1260	0.39	492
8	8.5	1349	0.39	526
9	10.8	709	0.39	277
10	10.2	1484	0.39	579
11	10.7	1177	0.39	459
		9324		3694

DIAGRAMMI DI PROGETTO

Sulla base delle valutazioni fatte finora si estende il modello di rendimento energetico per valutare le massime potenze estraibili da una serie di prototipi di varie dimensioni. Nei grafici seguenti si apprezzano le mappe delle potenze estraibili da questi, a meno del rendimento del PTO.

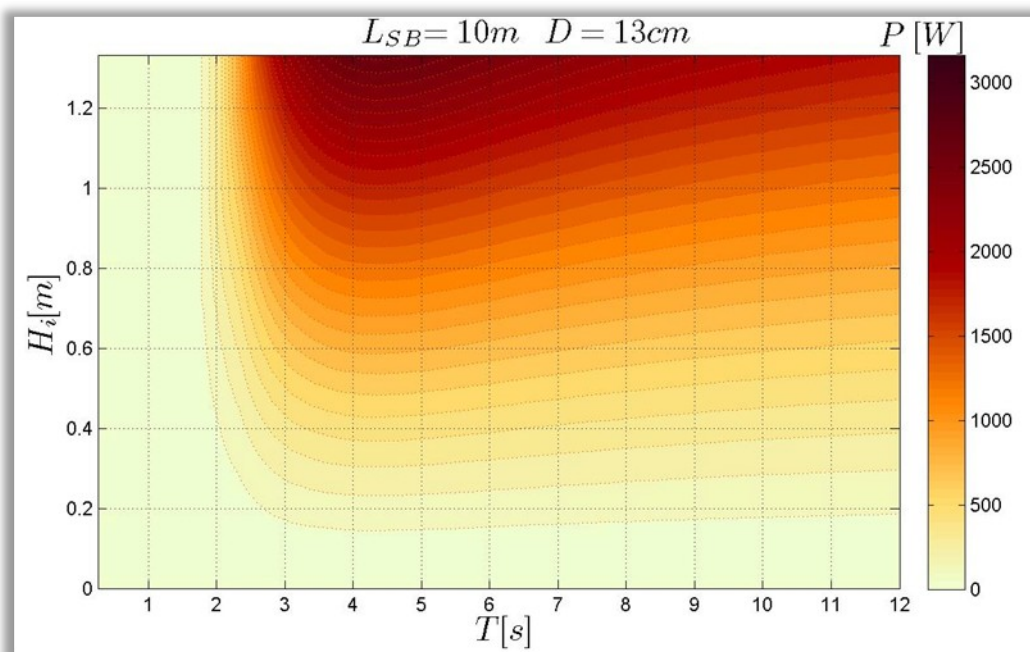


Figura 9.2 - Potenze estraibili da un prototipo di SeaBreath di lunghezza 10m (fattore di scala 6.67).

Figura 9.3 - Potenze estraibili da un prototipo di SeaBreath di lunghezza 25m e diametro dei collettori 33cm.

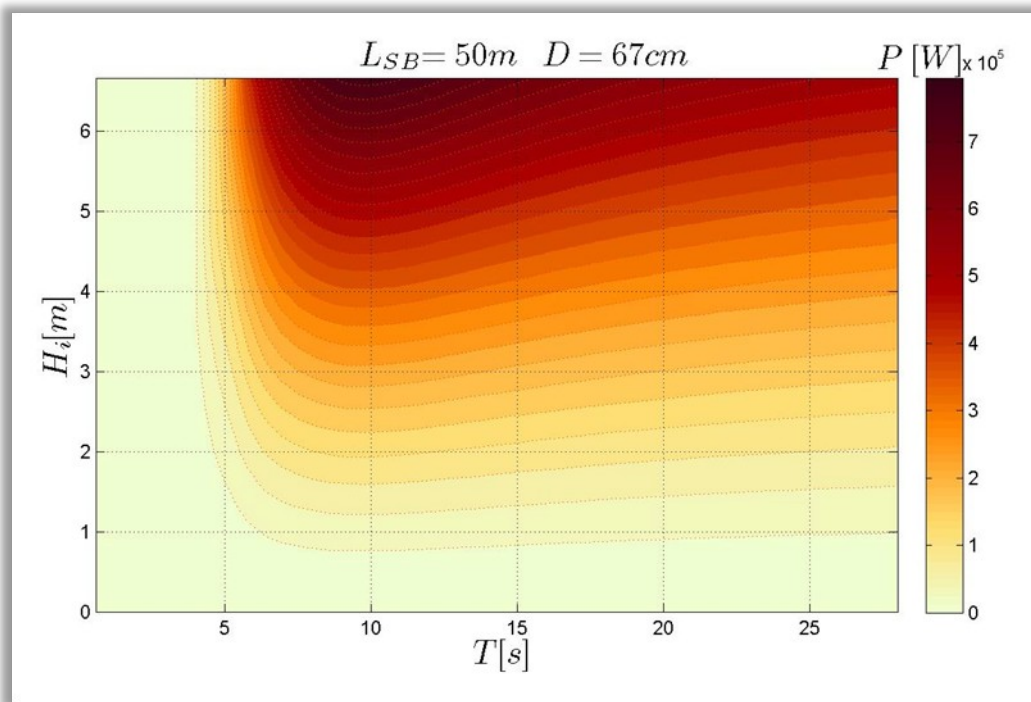


Figura 9.4 - Potenze estraibili da un prototipo di SeaBreath di lunghezza 50m e diametro dei collettori 67cm.

Figura 9.5 - Potenze estraibili da un prototipo di SeaBreath di lunghezza 100m e diametro dei collettori 133cm.