



PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE - LUPIAE MARIS 35 WTG – 525 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA





1 INDICE

2	1	PREI	MESSA	2
3	2	ANA	LISI PRELIMINARE DELLE SOTTOSTRUTTURE DI FONDAZIONE PER TURBINE	
4		EOLI	CHE OFFSHORE SELEZIONATE	3
5		2.1	METODOLOGIA	3
6		2.1.	1 Parametri di progetto	3
7		2.1.	2 Requisiti e vincoli della risposta statica	3
8		2.1.	3 Requisiti e vincoli della risposta dinamica	4
9		2.1.	4 Stima approssimativa del costo della distinta base	5
10		2.1.	5 Implementazione numerica	6
11		2.2		7
12		2.2.	1 Elementi critici del progetto	8
13		2.2.	2 Stabilità allo stato integro	9
14		2.2.	3 Analisi della risposta dinamica globale	11
15		2.3	CHIATTA CON BACINO DI SMORZAMENTO	_ 12
16		2.3.	1 Elementi critici del progetto	12
17			0.0.1.1. Monosta viscotta dal viscola imposta al neviada vetuvala di succulta	10
18			2.3.1.1 Mancato rispetto del vincolo imposto al periodo naturale di sussuito 2.3.1.2 Requisito dell'altezza minima del bordo libero non soddisfatto	-13
19		2.3.	2 Stabilità allo stato integro	14
20		2.3.	3 Analisi della risposta dinamica globale	_ 16
21	3	ANA	LISI NEL DOMINIO DEL TEMPO	_ 17
22		3.1	METODOLOGIA	17
23		3.2	PIATTAFORME SEMISOMMERGIBILE	_ 17
24 25		3.2.	1 Progettazione preliminare del sistema di ormeggio per piattaforme semisommergibili	17
26		3.2.	2 Analisi nel dominio del tempo per l'intero sistema interconnesso	_ 20
27			3.2.2.1 Analisi di decadimento	22
28			3.2.2.2 Analisi dinamica considerando gli effetti di vento e onde	22
29		3.3	CHIATTA CON BACINO DI SMORZAMENTO	_ 25
30 21		3.3.	1 Progettazione preliminare del sistema di ormeggio per chiatte con bacino	25
32		22	2 Analisi nol dominio dol tomno nor chiatto con turbina oplica o sistema di	_ 23
32 33		5.5.	ormeggio	28
34			3.3.2.1 Analisi di decadimento	29
35			3.3.2.2 Analisi dinamica considerando gli effetti di vento e onde	29
36	4	CON	CLUSIONI	32
37		4.1	CONFIGURAZIONE TIPO SEMISOMMERGIBILE	32
38		4.2	CONFIGURAZIONE TIPO CHIATTA CON BACINO DI SMORZAMENTO	32
39		4.3	VALUTAZIONI FINALI	_ 33
40	5	RIFE	RIMENTI	34



1 PREMESSA

Con la presente relazione si intende illustrare lo studio realizzato in collaborazione con l'Università di Strathclyde e finalizzato al dimensionamento ed alla verifica delle sottostrutture di fondazioni selezionate per l'impianto eolico offshore in progetto, considerando l'aerodinamica della turbina eolica, l'idrodinamica della sottostruttura galleggiante e la dinamica del sistema di ormeggio.

In esito ad una prima fase di studio svolta dall'Università di Strathclyde (vedi R.3.1 - Relazione generale) sono state selezionate due configurazioni di sottostrutture per turbine eoliche flottanti ritenute idonee in base alle caratteristiche dell'aerogeneratore e dello specchio d'acqua considerato:

- 1. Sottostruttura stabilizzata da figura di galleggiamento, tipo semisommergibile
- 2. Sottostruttura stabilizzata da figura di galleggiamento, tipo chiatta con bacino di smorzamento

Entrambe le piattaforme selezionate saranno oggetto di dimensionamento preliminare. Si procederà quindi all'analisi della risposta nel dominio della frequenza adottando un modello lineare della dinamica combinata aero-idraulica (**analisi di livello 1**).

Il modello andrà poi implementato con la progettazione ed il dimensionamento del **sistema di ormeggio** in modo da poter realizzare una analisi di dettaglio, utilizzando un modello dinamico combinato aero-idroservo-elastico non lineare nel dominio del tempo (**analisi di livello 2**).

Si potrà così verificare il funzionamento dell'insieme costituito dalle sottostrutture scelte (in entrambe le configurazioni considerate) assemblate con la turbina e connesse al sistema di ormeggio selezionato, nelle condizioni meteomarine più severe riferite al sito d'impiego individuato.



2 ANALISI PRELIMINARE DELLE SOTTOSTRUTTURE DI FONDAZIONE PER TURBINE EOLICHE OFFSHORE SELEZIONATE

Nei successivi paragrafi viene eseguito un dimensionamento preliminare (analisi di livello 1) di entrambe le configurazioni di sottostrutture per turbine eoliche flottanti selezionate (vedi R.3.1 - Relazione generale), considerando il modello di turbina eolica specifico presentato nel capitolo 2.1 della citata relazione generale R.3.1 e il sito presentato nel capito 2.2. La progettazione sarà realizzata utilizzando un approccio lineare nel dominio della frequenza che tenga conto dell'aerodinamica della turbina eolica, dell'idrodinamica della sottostruttura galleggiante e della dinamica del sistema di ormeggio. L'obiettivo è quello di ottenere una stima preliminare delle principali dimensioni delle due configurazioni scelte di struttura di sostegno per aerogeneratori flottanti (Floating Offshore Wind Turbine – FOWT).

2.1 METODOLOGIA

In questa fase, le due configurazioni di supporto galleggianti selezionate, ovvero il semisommergibile e la chiatta con bacino di smorzamento, vengono predimensionate considerando una serie di requisiti e vincoli.

Il procedimento di progettazione è suddiviso nelle seguenti fasi, sulla base di Collu et al.¹:

- Definizione dei parametri di progetto
- Requisiti e vincoli di risposta statica
- Requisiti e vincoli di risposta dinamica
- Stima approssimativa del costo della distinta base

2.1.1 Parametri di progetto

Per definire i parametri di progetto si individuando le principali dimensioni geometriche che descrivono la configurazione considerata: queste sono illustrate graficamente in Figura 2.4 (semisommergibile) e Figura 2.8 (chiatta con bacino di smorzamento).

Tali parametri vengono fatti variare in un intervallo di valori significativi e viene, così, individuata la configurazione ottimale, quella, cioè, in grado di soddisfare tutti i requisiti e vincoli minimizzando il costo capitale stimato.

2.1.2 Requisiti e vincoli della risposta statica

Sono stati imposti i seguenti requisiti e vincoli di risposta statica (a meno che non sia specificato un criterio diverso):

- <u>Galleggiabilità</u>. La somma del peso totale della piattaforma (compresi RNA, torre, massa strutturale della sottostruttura e massa di zavorra) più la componente verticale della forza di ormeggio totale deve essere uguale alla forza di galleggiamento totale. In termini pratici, significa che la massa di zavorra deve essere positiva con un certo margine.
- <u>Stabilità allo stato integro.</u> In questa fase preliminare, sono stati rispettati i requisiti di stabilità allo stato integro come delineati nella norma DNV-ST-0119 "Floating wind turbine structure" [2]. Come indicato nella stessa norma, trattandosi di un sistema non presidiato, non è obbligatorio considerare la stabilità

¹ Collu, M., Brennan, F.P. and Patel, M.H., 2014. Conceptual design of a floating support structure for an offshore vertical axis wind turbine: the lessons learnt. Ships and Offshore Structures, 9(1), pp.3-21.



in condizioni di avaria, che quindi non viene considerata. Il momento di sbandamento è stato calcolato alla velocità del vento nominale, includendo sia il contributo della forza di spinta aerodinamica che agisce sul rotore sia la resistenza aerodinamica anteriore che agisce sulla torre.

- <u>Valore massimo dell'angolo di inclinazione medio alla velocità nominale del vento²</u>. Non esiste una regola precisa sul valore massimi dell'angolo di inclinazione medio (dovuto principalmente alla forza di spinta che agisce sul rotore), poiché questo è solitamente un requisito imposto dall'OEM dell'aerogeneratore e può variare da produttore a produttore. Ad ogni modo, sulla base della letteratura pubblica², è stato considerato un valore statico (cioè medio) del massimo angolo di inclinazione $\theta_{S,max}$, pari a 5 gradi, e un angolo di inclinazione massimo totale θ di 10 gradi, pari alla somma del valore statico più l'ampiezza dell'angolo di oscillazione dinamica (θ_D) in rollio, a causa dei carichi d'onda.
- Bordo libero minimo e pescaggio minimo. Vengono imposti due parametri dimensionali minimi in base alle condizioni d'onda locali, uno per il bordo libero, distanza verticale tra la quota della linea di galleggiamento e il piano del ponte, necessaria per evitare il fenomeno dell'*"greenwater"* (ovvero l'immersione della prua in acqua), ed una per il un pescaggio, necessaria per evitare lo slamming (ovvero il livello dell'onda sotto la parte più bassa della piattaforma). Considerando pertanto l'altezza significativa dell'onda per un periodo di ritorno di 50 anni pari a 6,36 m, la soglia minima di bordo libero minimo e la soglia minima di pescaggio sono state imposte entrambe pari a 10 m, lasciando pertanto un adeguato margine di sicurezza. Altri requisiti possono richiedere un pescaggio maggiore.

2.1.3 Requisiti e vincoli della risposta dinamica

Dal punto di vista della risposta dinamica, è stato adottato il seguente criterio:

- <u>I periodi naturali dell'intero sistema di corpo rigido devono trovarsi all'esterno degli intervalli dei periodi delle forze di eccitazione oscillatoria</u>. In questa fase iniziale di studio, i periodi naturali del corpo rigido vengono stimati con un approccio basato sull'analisi di frequenza. Le forze di eccitazione considerate sono: forze aerodinamiche 1P e 3P e carichi d'onda del 1° ordine. L'intervallo di frequenze delle forze aerodinamiche 1P e 3P si basa sulla velocità di rotazione del rotore, mentre l'intervallo di frequenze dei carichi d'onda del 1° ordine è stimato utilizzando uno spettro d'onda JONSWAP, basato sulle condizioni descritte nella relazione R.3.1 "Relazione generale" al capitolo 2.2.5 "Distribuzione correlata di vento e onde" Gli spettri delle onde per le condizioni operative ed estreme fornite nella Tabella 2.17 della già citata relazione descrittiva R.3.1 sono riportati nella Figura 2.1 e nella Figura 2.2. L'intervallo di frequenze da evitare è definito come l'intervallo tra le frequenze in cui l'intensità dello spettro dell'onda è il 5% dell'intensità massima dello spettro dell'onda. Pertanto, si ha che l'intervallo di frequenze da evitare è 0.41 rad/s < ω < 3.87 rad/s che corrisponde ad un l'intervallo di periodi da evitare pari a 1.6 s < T < 15.3 s.

² Collu, M., and M. Borg. "Design of floating offshore wind turbines." Offshore wind farms. Woodhead Publishing, 2016. 359-385.





Figura 2.1: Spettro d'onda per DLC1-DLC3 negli intervalli di frequenza 1P-3P



Figura 2.2:spettro d'onda per il DLC4 e per le condizioni estreme

2.1.4 Stima approssimativa del costo della distinta base

In via preliminare e per poter selezionare la tipologia di piattaforma galleggiante da adottare, risulta più importante stimare la differenza nei costi capitale (approssimativi) delle configurazioni di sottostrutture



esaminate piuttosto che il loro costo assoluto. Inoltre, in questa fase di progettazione, i dettagli disponibili non sono sufficienti per stimare con precisione la spesa in conto capitale (CAPEX) e pertanto le stime dei costi vengono effettuate secondo l'approccio della distinta base, ovvero valutando le tonnellate di materiale strutturale necessarie per la costruzione della sottostruttura galleggiante (escluse la torre, la navicella, e il rotore, i cui costi sono considerati uguali per tutte le configurazioni analizzate).

2.1.5 Implementazione numerica

<u>Per il dimensionamento preliminare</u> sono stati adottati due metodi distinti, per poter verificare in maniera incrociata i risultati.

Il primo approccio si basa su metodi basati sui principi primi, implementando in un foglio di calcolo i pertinenti criteri di dimensionamento dell'architettura navale e dell'ingegneria oceanica insieme con i vincoli specificati nelle sezioni 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3, e stimando così la massa strutturale totale della sottostruttura in 8.1.4.

Il secondo approccio si basa sulla raccolta di informazioni sulle turbine eoliche galleggianti progettate da Principle Power per la configurazione semisommergibile e da Ideol per la chiatta con bacino di smorzamento. Questi progetti noti sono dimensionati per potenze nominali di turbine eoliche inferiori a 15 MW e pertanto sono stati opportunamente scalati e messi a confronto con i risultati ottenuti con il primo approccio di dimensionamento preliminare.

Per la verifica dei vincoli di <u>stabilità allo stato integro</u> e del<u>l'angolo di inclinazione massimo</u>, è stato utilizzato un software di analisi idrodinamica specializzato per calcolare il momento di raddrizzamento.

Per <u>i requisiti e i vincoli della risposta dinamica</u>, è stato utilizzato un software di analisi idrodinamica specializzato per condurre un'analisi di frequenza idrodinamica, applicando la teoria del flusso potenziale alle parti di grande volume di ciascuna struttura.



2.2 SEMISOMMERGIBILE



Figura 2.3: Configurazione semisommergibile tipo Windfloat da 2MW [3] La configurazione semisommergibile da 15MW proposta in questa relazione si basa su questa e su configurazioni similari di maggiori dimensioni (confronta il paragrafo 2.2.1)

Nella figura 2.4 viene rappresentato il modello parametrico utilizzato per la piattaforma semisommergibile. Si considera un'unità semisommergibile a tre colonne uniformemente distanziate secondo un angolo di 120°. La turbina eolica si trova su una colonna. I serbatoi dell'acqua di zavorra sono posizionati all'interno di tutte le colonne sebbene nella colonna su cui sarà installata la turbina eolica viene collocata meno zavorra. Alla base delle tre colonne è presente una "piastra di intrappolamento dell'acqua" esagonale, che ha il duplice vantaggio di aumentare la massa aggiunta e quindi abbassare le frequenze naturali (cioè aumentare il periodo naturale) della piattaforma in sussulto e in beccheggio, e di aumentare, inoltre, la resistenza viscosa, il che contribuisce a diminuire la risposta globale della piattaforma.

Applicando la metodologia indicata nella sezione 2.1, è stata condotta un'analisi parametrica ottenendo così un dimensionamento preliminare che minimizza la massa dell'acciaio strutturale pur soddisfacendo i requisiti preliminari e i vincoli considerati. Le principali caratteristiche della piattaforma sono riportate nella Tabella 2.1.



2.2.1 Elementi critici del progetto

Così come descritto nella sezione 2.1.5, il dimensionamento preliminare, ottenuto implementando i principi primi su un foglio di calcolo e con codici MATLAB, è stato confrontato con le risultanze dell'attività di scaling up. Le configurazioni prese in considerazione per l'esercizio di scaling up sono le configurazioni da 2 MW e 6 MW della sottostruttura denominata Windfloat di Principle Power presentate in "WindFloat Pacific OSW Project BOEM Workshop Sacramento, CA July 29, 2014"³ e la configurazione da 8 MW di Principle Power presentata in "Banister, *K., 2017. WindFloat Pacific Project, Final Scientific and Technical Report (No. DE-EE0005987). Principle Power, Inc., Emeryville, CA (United States)*"⁴.

Come chiarito nel "Technical Report⁷⁴ "il sistema di assetto dello scafo brevettato del WindFloat (noto anche come zavorra attiva) distribuisce la zavorra d'acqua tra le tre colonne del WindFloat per compensare la spinta variabile della turbina dovuta ai cambiamenti a bassa frequenza della velocità e della direzione del vento".

Pertanto, anche se non viene rispettato il vincolo rappresentato dal *"massimo angolo statico di inclinazione alla velocità del vento nominale"*, tale angolo può essere diminuito (teoricamente anche fino a zero) utilizzando il sistema sopra citato. Ciò ha consentito di ridurre la distanza tra i centri delle colonne calcolata con il metodo dei principi primi ad un valore simile a quello ottenuto scalando la piattaforma dalle configurazioni 2MW, 6MW e 8MW.

Sempre nel medesimo "Technical Report"⁴ si cita un valore di 400 t/MW (ad esempio "400 tonnellate di acciaio strutturale utilizzato per la sottostruttura per ogni MW dell'aerogeneratore), di poco superiore al valore qui ottenuto. Tuttavia, il valore qui ottenuto può essere considerato ragionevole perché non tiene conto dell'acciaio per i sistemi ausiliari (es. l'eliporto o i camminamenti in cima alle travi orizzontali superiori), ed anche perché si prevede che questo valore possa diminuire all'aumentare della potenza nominale dell'aerogeneratore.



Figura 2.4: rappresentazione delle dimensioni generali del "semisommergibile"

³ https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjtpvjSttXwAhUOiFwKH cOLA2UQFjAAegQIBRAD&url=https%3A%2F%2Fwww.boem.gov%2FNREL-WindFloat-Pacific-OSW-

Project%2F&usg=AOvVaw3LDz5KATwxpqxEY6cyU_9u, ritrovata il 12/05/2021

⁴ <u>https://www.osti.gov/biblio/1339449-windfloat-pacific-project-final-scientific-technical-report</u>, ritrovata il 05/05/2021

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE



Parameters	Unit	Value	Notes
Mass of steel	t	~4800	Around 320 t/MW
Static angle of inclination at rated wind speed	deg	10.9 se	KO: larger than $\theta_{S,max}$, see ection 2.2.1
Heave natural period	S	20.5	OK: outside oscillating excitation force range
Pitch natural period	S	31.6	OK: outside oscillating excitation force range
Roll natural period	S	31.6	OK: outside oscillating excitation force range
a, water entrapment side length	m	19.5	
b , column diameter	m	15.0	
\mathbf{c} , centre-to-centre column distance	m	80	
\mathbf{d} , water entrapment plate thickness	m	1.0	
e, total column height	m	30.0	OK: freeboard (e-f) larger than min required
f, draft	m	20.0	OK: larger than min draft
Total displacement (volumetric)	m ³	~14 400	
Total displacement (mass)	t	~14 756	

Tabella 2.1: principali caratteristiche del "semisommergibile"

2.2.2 Stabilità allo stato integro

È stato sviluppato il "panel model" del "semisommergibile" illustrato in Figura 2.5, completato con elementi di Morison per rappresentare i componenti di volume minore della piattaforma (elementi di connessione e controventature). Questo modello, insieme al baricentro, alla massa e ai momenti di inerzia ottenuti dall'analisi del dimensionamento preliminare, è stato utilizzato per condurre l'analisi di stabilità allo stato integro, calcolando il momento di raddrizzamento e confrontandolo con la curva del momento di sbandamento del vento calcolata, vedi grafico in Figura 2.6.

Il rapporto tra l'area sotto la curva del momento di raddrizzamento (da 0 gradi alla seconda intercetta) e l'area corrispondente sotto il momento di sbandamento del vento è 1,497, tale valore è maggiore di 1,3, limite di stabilità allo stato integro prescritto in [2] per i *"semisommergibili"*.





Figura 2.5: "panel model" del "semisommergibile" completato con elementi di Morison per gli elementi di connessione tra le colonne



Figura 2.6: momento di raddrizzamento vs momento di sbandamento, analisi di stabilità allo stato integro per i semisommergibili.



2.2.3 Analisi della risposta dinamica globale

Il *"panel model"* realizzato per l'analisi di stabilità allo stato integro è stato utilizzato anche per condurre l'analisi idrodinamica basata sul flusso potenziale, nel dominio della frequenza, al fine di avere una stima preliminare dei periodi naturali del movimento globale del corpo rigido della piattaforma.

Nella Tabella 2.2 sono riportati i periodi naturali di sussulto (Heave), rollio (Roll) e beccheggio (Pitch) del corpo rigido stimati con l'analisi in frequenza. Si evidenzia che il periodo naturale di sussulto indicato nella Tabella 2.1 è il valore approssimato stimato con un metodo disaccoppiato e utilizzando i codici di calcolo della "strip-theory", mentre il valore riportato in Tabella 2.2 è stato calcolato utilizzando il software specialistico che adotta un approccio accoppiato.

Degree of freedom	Natural period [s]	Note
Heave	20.5	OK: outside oscillating excitation force range
Roll	31.6	OK: inside oscillating excitation force range
Pitch	31.6	OK: inside oscillating excitation force range

Tabella 2.2: periodi naturali di sussulto, rollio e beccheggio del corpo rigido (calcolati con l'analisi di frequenza)



2.3 CHIATTA CON BACINO DI SMORZAMENTO



Figura 2.7: Configurazione da 2MW della chiatta con vasca di smorzamento della IDEOL [4] – la configurazione da 15MW in questa relazione è ottenuta a partire da questo modello e da modelli similari di maggiore dimensione (confronta la sezione 2.3.1)

Nella figura 2.8 viene rappresentato il modello parametrico utilizzato la chiatta con bacino di smorzamento. Si tratta di una chiatta quadrata con vasca di smorzamento centrale, dove ogni lato ha una sezione trasversale simile (rettangolare). In più vi è una piastra (*"skirt"*) esterna attorno all'intero perimetro della piattaforma, che contribuisce a migliorare le caratteristiche di risposta dinamica aumentando la massa aggiunta nei movimenti di sussulto e rollio/beccheggio, oltre a contribuire allo smorzamento viscoso. La turbina eolica viene posizionata su un lato della piattaforma. I serbatoi dell'acqua di zavorra sono posizionati all'interno dei quattro fianchi, in modo tale che il centro di massa totale sia nelle stesse coordinate x e y del centro di carena.

Per agevolare il confronto con la configurazione semisommergibile si è scelto di considerate come materiale costruttivo l'acciaio, ma va notato che questo tipo di configurazione può essere realizzata sia in acciaio che in calcestruzzo.

Applicando la metodologia presentata nel paragrafo 2.1, è stata condotta un'analisi parametrica e realizzato il dimensionamento preliminare, in modo da minimizzare la massa di acciaio strutturale pur soddisfacendo i requisiti preliminari e i vincoli considerati. Le principali caratteristiche della piattaforma sono riportate nella Tabella 2.3.

2.3.1 Elementi critici del progetto

Come già spiegato nella sezione 2.1.5, anche per la chiatta con vasca di smorzamento, il dimensionamento preliminare ottenuto mediante un foglio di calcolo ed un programma in MATLAB basati sui



principi primi è stato confrontato con le risultanze dell'attività di scaling up di modelli noti progettati per aerogeneratori di potenza inferiore. Le configurazioni considerate per l'esercizio di scaling up sono la configurazione da 2 MW presentata in *"Alexandre, A., Percher, Y., Choisnet, T., Buils Urbano, R. and Harries, R., 2018. Coupled analysis and numerical model verification for the 2MW Floatgen demonstrator project with IDEOL platform In ASME 2018 1st International Offshore Wind Technical Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection"*, la configurazione da 5 MW presentata in *"Choisnet, T., Favré, M., Lyubimova, M. and Rogier, E., 2014, July. A Robust Concrete Floating Wind Turbine Foundation For Worldwide Applications. In Proceedings of Grand Renewable Energy 2014 Conference, AWTEC 2014"*, e la configurazione da 6 MW presentata in *"Choisnet, T., Geschier, B. and Vetrano, G., 2016. Initial comparison of concrete and steel hulls in the case of Ideol's square ring floating substructure. In Proceedings of the 15th World Wind Energy Conference and Exhibition, Tokyo, Japan (Vol. 31)."*

2.3.1.1 Mancato rispetto del vincolo imposto al periodo naturale di sussulto

Come menzionato nelle pubblicazioni su citate, la configurazione della chiatta con bacino di smorzamento si basa sull'effetto di smorzamento della vasca centrale che è brevettata⁵. Sebbene il periodo naturale stimato con l'analisi idrodinamica preliminare condotta in questa fase sia inferiore al minimo richiesto per evitare la risonanza con carichi di onde oscillatorie di primo ordine, bisogna considerare che la metodologia di questa analisi preliminare non è in grado di cogliere appieno l'effetto positivo del bacino di smorzamento. Nella *"Choisnet, T., Geschier, B. and Vetrano, G., 2016. Initial comparison of concrete and steel hulls in the case of Ideol's square ring floating substructure. In Proceedings of the 15th World Wind Energy Conference and Exhibition, Tokyo, Japan (Vol. 31)."* si riporta la procedura preliminare al dimensionamento della chiatta con bacino di smorzamento, ed in particolare si spiega che, per beneficiare dell'effetto del bacino di smorzamento, occorre che il rapporto tra la lunghezza della vasca di smorzamento (c nella Figura 2.4) e la dimensione della larghezza del pontone ((b-c)/2 nella Figura 2.7) corrisponda ad un ben determinato valore prefissato. Nella configurazione presentata in Tabella 2.3 è stato adottato esattamente il valore indicato di questo rapporto e, pertanto, ci si aspetta che la struttura, così dimensionata, possa beneficiare di un effetto positivo similare.

Se necessario, tale periodo naturale può essere migliorato, inoltre, modificando le dimensioni della "*skirt*" inferiore (ovvero la misura di a in Figura 2.8).

2.3.1.2 Requisito dell'altezza minima del bordo libero non soddisfatto

Come si può vedere nella Tabella 2.3, il requisito dell'altezza minima del bordo libero non è soddisfatto, poiché il bordo libero è d+e-f = 13,5 + 1 - 10,5 = 4 m. Tuttavia, questo valore è stato assunto nella configurazione presente sulla base delle configurazioni proposte nella pubblicazione sopra menzionata. Apparentemente, sembra che questo tipo di configurazione sia progettato per resistere agli eventi di *"greenwater"*.

⁵ <u>https://www.bw-ideol.com/en/technology</u>





Figura 2.8: Rappresentazione di una chiatta con bacino di smorzamento

Parameters	Unit	Value	Notes
Mass of steel	t	~6,059	Around 404 t/MW
Static angle of inclination at rated wind speed	deg	4.99	OK: less than $\theta_{S,max} = 5^{\circ}$
Heave natural period		12	KO: smaller than T_ _{high} =15.3s, but can be improved by larger skirt length
Pitch natural period	s	15.5	OK: larger than T_high=15.3s
a, skirt length	m	67.5	
b, pontoon length (outer)	m	56.2	
c, pontoon length (inner),	m	33.1	
d, total pontoon height		13.5	KO: freeboard (d+e-f) lower than min required, see section 2.3.1.2
e, skirt thickness	m	1.0	
f, draft	m	10.5	OK: larger than min draft
Total displacement (volumetric)	m ³	~23 108	
Total displacement (mass)	t	~23 686	

Tabella 2.3: principali caratteristiche di una chiatta con bacino di smorzamento

2.3.2 Stabilità allo stato integro

È stato sviluppato il "panel model" della chiatta con bacino di smorzamento illustrato in Figura 2.9. Questo modello, insieme al baricentro, alla massa e ai momenti di inerzia determinati dall'analisi del dimensionamento preliminare, è stato utilizzato per compiere l'analisi di stabilità allo stato integro, calcolando il momento di



raddrizzamento e confrontandolo con la curva del momento di sbandamento del vento calcolata, vedi grafico in Figura 2.10.

Il rapporto tra l'area sotto la curva del momento di raddrizzamento (da 0 gradi alla seconda intercetta) e l'area corrispondente sotto il momento di sbandamento del vento è 1,42, tale valore è maggiore di 1,4 e soddisfa quindi il criterio di stabilità allo stato integro come prescritto in [2] per le "*chiatte*".







Figura 2.10: momento di raddrizzamento vs momento di sbandamento, analisi di stabilità allo stato integro per le "chiatte"



2.3.3 Analisi della risposta dinamica globale

Il *"panel model"* realizzato per l'analisi di stabilità allo stato integro è stato utilizzato anche per condurre l'analisi idrodinamica basata sul flusso potenziale, nel dominio della frequenza, al fine di avere una stima preliminare dei periodi naturali del movimento globale di corpo rigido della piattaforma.

Nella Tabella 2.4 sono riportati i periodi naturali di sussulto (Heave), rollio (Roll) e beccheggio (Pitch) del corpo rigido stimati con l'analisi in frequenza

I periodi naturali di rollio e beccheggio possono essere considerati bassi per una generica località offshore (come quelle in cui sono installati gli attuali parchi eolici galleggianti dove, tipicamente, è richiesto un periodo >25s), ma possono essere considerati accettabili per la località qui considerata, poiché il clima ondoso è più mite rispetto alle condizioni meteo oceaniche nelle suddette località. Tuttavia, se è richiesto un periodo di rollio/beccheggio maggiore, è possibile modificare la dimensione del parametro "a" nella configurazione proposta, in modo da ottenere il periodo naturale di rollio/beccheggio voluto.

Per quanto concerne il periodo naturale di sussulto occorre fare riferimento alle spiegazioni fornite nella precedente sezione 2.3.1.1.

Degree of freedom	Natural period [s]	Note
Heave	12.0	KO: lower that T_min, but see section 8.3.1.1
Roll	15.5	OK: outside oscillating excitation force range
Pitch	15.5	OK: outside oscillating excitation force range

Tabella 2.4: periodi naturali di sussulto (Heave), rollio (Roll) e beccheggio (Pitch) del corpo rigido stimati con l'analisi in frequenza



3 ANALISI NEL DOMINIO DEL TEMPO

3.1 METODOLOGIA

L'obiettivo principale dell'analisi nel dominio del tempo di seguito descritta è di valutare la risposta di ciascuna piattaforma ai carichi del vento e delle onde, considerando anche le forze non lineari che non possono essere trattate con il metodo dell'analisi nel dominio della frequenza, nelle condizioni di carico individuate nella relazione R.3.1 "Relazione generale".

Il sistema di ormeggio a catenaria scelto impone forze non lineari sulla piattaforma e, pertanto, prima di realizzare l'analisi nel dominio del tempo verrà elaborato il progetto preliminare del sistema di ormeggio. Nel dimensionamento del sistema di ormeggio si applicano i seguenti criteri:

- Lo spostamento massimo di deriva e/o abbrivio deve risultare inferiore al 15% della profondità del mare (per evitare danni al cavo elettrico)
- la forza di tensione sui cavi di ormeggio non può superare il valore massimo consentito (per evitare danni alla cima di ormeggio)

Successivamente, il sistema di ormeggio qui sviluppato ed i modelli idrodinamici della sottostruttura sviluppati nel capitolo 2 vengono implementati numericamente all'interno del modello OpenFAST, un modello dinamico accoppiato aero-idro-servo-elastico, per poter calcolare la risposta dinamica dell'intera piattaforma considerando l'aerodinamica, l'idrodinamica, la strategia di controllo e gli aspetti di dinamica strutturale.

In particolare, vengono stimati sia il moto della piattaforma che le forze di tensione sui cavi di ormeggio per valutare se il moto è entro il limite sopra indicato

3.2 PIATTAFORME SEMISOMMERGIBILE

3.2.1 Progettazione preliminare del sistema di ormeggio per piattaforme semisommergibili

Il layout del sistema di ormeggio proposto per la piattaforma semisommergibile è illustrato nella figura 3.1. Il sistema di riferimento considerato corrisponde a quello già utilizzato per la progettazione della piattaforma.

Ci sono tre linee di ormeggio e ognuna è collegata ad una colonna. Un sistema di ormeggio così configurato va considerato alla stregua di un progetto preliminare in cui ogni linea di ormeggio può anche rappresentare (in una fase di progettazione successiva) l'effetto di più di una catenaria.

Le proprietà dei materiali delle linee di ormeggio sono tratte da [1] e i dettagli sono presentati nella tabella 3.1 e nella tabella 3.2. Si è utilizzato uno script MATLAB per stimare le caratteristiche geometriche principali della linea di ormeggio (punto di contatto sul fondo del mare della linea e coordinate di ancoraggio proposte) presentate in tabella 3.3, considerando lo stesso sistema di coordinate utilizzato per il dimensionamento della piattaforma, vengono così individuate la posizione dei punti di contatto (passacavi - Fairlead) della linea di ormeggio alla piattaforma, i (primi) punti in cui le linee di ormeggio toccano il fondo marino (in equilibrio, condizione indisturbata) (touchdown) e i punti di ancoraggio (Anchor).





Figura 3.1: rappresentazione del sistema di ormeggio progettato per piattaforme semisommergibili

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE



Parameter	Unit	Value
Mooring system type	-	Chain Catenary
Line Type	-	R3 Studless Mooring Chain
Line Breaking Strength	kN	22,286
Number of Lines	-	3
Anchor Depth	m	150
Fairlead Depth	m	20
Dry Line Linear Density	Kg/m	685
Diameter	m	0.333
Line length	m	600
Horizontal Restoring Stiffness (static analysis)	kN/m	6000
Pre-tension force	kN	2280

Tabella 3.1: proprietà del sistema di ormeggio per piattaforme semisommergibili

In tabella 3.2 si riportano i coefficienti idrodinamici utilizzati per calcolare i coefficienti di trascinamento della linea di ormeggio e di massa aggiunta

Mooring Line Coefficients	Relative to Chain Nomina Diameter	l Relative to Volume-Equivalent Diameter
Normal Added Mass	1	0.82
Tangential Added Mass	1	0.27
Normal Drag	2	1.11
Tangential Drag	1.15	0.20

Tabella 3.2: coefficienti di trascinamento e di massa aggiunta della linea di ormeggio

Nella tabella 3.3, si individuano, considerando lo stesso sistema di coordinate utilizzato per la piattaforma, la posizione dei punti di attacco della linea di ormeggio alla piattaforma (*"fairlead"*), i (primi) punti in cui le linee di ormeggio toccano il fondo marino (in equilibrio, in condizioni indisturbate) (*"touchdown"*) e i punti di ancoraggio (*"Anchor"*).

Nella figura 3.2 è riportato il grafico di una linea di ormeggio in equilibrio statico (condizioni non perturbate), nell'immagine il rettangolo grigio rappresenta una delle colonne.

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE



	X (m)	Y (m)	Z (m)	
Fairlead1	-46.2	0	-20	
Fairlead2	23.1	-40	-20	
Fairlead3	23.1	40	-20	
Touchdown1	-276.2	0	-150	
Touchdown2	222.3	-155.0	-150	
Touchdown3	222.3	155.0	-150	
Anchor1	-606.1	0	-150	
Anchor2	303.0	-524.9	-150	
Anchor3	303.0	524.9	-150	
Anchors	303.0	524.9	-150	

Tabella 3.3: Posizione dei passacavi (Fairleads), dei punti di contattato sul fondale (touchdown), e delle ancore(Anchors) per il sistema di ormeggio di un semisommergibile



Figura 3.2: Configurazione statica di una linea di ormeggio per piattaforme semisommergibili. MLV -= Mean Waterline Level (livello medio dl mare)

3.2.2 Analisi nel dominio del tempo per l'intero sistema interconnesso

Come indicato nella sezione 3.1, le analisi nel dominio del tempo vengono eseguite considerando l'intero sistema, cioè la piattaforma semi-sommergibile, il sistema di ormeggio sviluppato nella sezione 3.2.1 e la turbina eolica IEA 15 MW.

La prima analisi condotta è la cosiddetta "analisi di decadimento", dove non vengono considerati né il vento, né l'onda e nemmeno la corrente, ma bensì la piattaforma viene inizialmente spostata di una certa quantità per ciascun grado di libertà (uno per volta ottenendo 6 simulazioni) e la risposta del sistema viene utilizzata per valutare i periodi naturali della piattaforma.



La seconda analisi considera invece le condizioni del vento e delle onde. Per realizzare la certificazione della struttura sono da considerare un gran numero di casi di carico, ma, in questa fase preliminare, è stato considerato solo il caso di carico peggiore, con onde del periodo di ritorno di 50 anni (massimi carichi d'onda) e velocità del vento nominale (massimi carichi aerodinamici), provenienti dalla stessa direzione (allineati con l'asse x).

La definizione del sistema di coordinate per questa analisi nel dominio temporale è illustrata nella figura 28 (si noti che è diverso dal sistema di coordinate globale utilizzato in precedenza). Il punto di origine è la proiezione del punto centrale della base della torre sul livello medio della linea di galleggiamento.



(b) Origin of the coordinate system in vertical plane

Figura 3.3: Definizione del sistema di riferimento utilizzata per le analisi OpenFAST della piattaforma semisommergibile



3.2.2.1 Analisi di decadimento

Prima di poter realizzare l'analisi dinamica, vanno eseguite le analisi di decadimento libero per calcolare il periodo naturale dell'intero sistema. I risultati corrispondenti sono riportati nella tabella 3.4. Come si può vedere, questi valori sono prossimi ai valori stimati con l'analisi precedente (Tabella 2.2), che risultano, pertanto, verificati e affinati.

Degree of freedom	Natural period [s]
Surge	86.4
Sway	86.2
Heave	20.5
Roll	33.7
Pitch	30.3
Yaw	105.4

Tabella 3.4:periodi naturali dell'intero sistema con piattaforma semisommergibile

3.2.2.2 Analisi dinamica considerando gli effetti di vento e onde

Come accennato in precedenza, si considera la condizione di carico nello scenario peggiore, che corrispondente alle condizioni di onda stimate con tempo di ritorno pari a 50 anni e una velocità del vento corrispondente alla velocità del vento nominale della turbina eolica, si ha quindi, $H_s = 6,36$ m e $T_p=8.24$ s per le onde e per il vento una velocità pari a $V_w=10.59$ m/s. Sia il vento che le onde sono considerante in direzione x positiva. La corrente non è considerata in questa analisi.

I movimenti della piattaforma, rappresentati dallo spostamento del punto di origine nelle tre direzioni, abbrivio (surge), beccheggio (pitch) e sussulto (heave), sono stati rappresentati nei grafici contenuti nelle figure che seguono considerando un tempo di simulazione t = 3000 s, nella tabella sono inoltre riportati, per ciascun parametro di spostamento, i valori minimi, massimi e della deviazione standard (calcolati escludendo il periodo transitorio iniziale di circa 500 secondi).

DOF Motions	Surge	Pitch	Heave
Maximum value	14.56	5.17	4.06
Mean value	13.15	4.69	3.65
Minimum value	12.26	4.141	3.33
Standard deviation	0.336	0.172	0.110

Tabella 3.5: Valori massimi, medi, minimi e della deviazione standard dei moti di abbrivio (surge), beccheggio
(pitch) e sussulto (heave)

Lo spostamento massimo in abbrivio è di circa 14,6 m (si sottolinea che il periodo transitorio iniziale, da 0 a 500 s, non è stato considerato), risulta inferiore al 15% della profondità dell'acqua e soddisfa pertanto il criterio considerato nella sezione 3.1.

Per quanto concerne il beccheggio della piattaforma, come segnalato in precedenza, c'è un angolo medio di 4,8 gradi a causa dei carichi di vento, e un'oscillazione intorno a questo valore a causa dei carichi d'onda.



Questi valori sono, comunque, molto bassi, ed è, inoltre, possibile diminuire l'angolo medio utilizzando il sistema di zavorra attiva di questa configurazione semisommergibile.

Per quanto riguarda il sussulto, ancora una volta, si noti che questo è il valore dello spostamento di sussulto al di sotto della torre su cui è installato l'aerogeneratore, a causa dell'inclinazione dovuta al beccheggio. Anche in questo caso, se si utilizza il sistema di zavorra attivo, questo valore può essere notevolmente ridotto.



(b) Pitch motion for semi-submersible platform





(c) Heave motion for semi-submersible platform

Figura 3.4: movimenti di abbrivio (a). (surge), beccheggio (b) (pitch) e sussulto (c) (heave) della piattaforma semisommergibile

In figura 3.5 si mostra l'andamento temporale della forza di tensione in corrispondenza del passacavo della linea di ormeggio. Dalla figura si può osservare che la forza di tensione massima non supera il valore limite consentito. Pertanto, il sistema di ormeggio progettato può essere utilizzato con la piattaforma proposta.



Figura 3.5: forze di tensione in corrispondenza dei passacavi delle linee di ormeggio. La linea 1 è allineata lungo l'asse x



3.3 CHIATTA CON BACINO DI SMORZAMENTO

3.3.1 Progettazione preliminare del sistema di ormeggio per chiatte con bacino di smorzamento

Il layout del sistema di ormeggio proposto per la piattaforma tipo chiatta con bacino di smorzamento è rappresentato nella Figura 3.6. La definizione del sistema di coordinate è la stessa di quella considerata per il progetto della piattaforma tipo chiatta. Ci sono quattro linee di ormeggio e ognuna è collegata a un angolo del pontone. Un sistema di ormeggio così configurato va considerato alla stregua di un progetto preliminare in cui ogni linea di ormeggio può anche rappresentare (in una fase di progettazione successiva) l'effetto di più di una catenaria. Le proprietà dei materiali delle linee di ormeggio sono tratte da [1], e i dettagli sono forniti in Tabella 3.6 e Tabella 3.7. È stato utilizzato uno script MATLAB per stimare le caratteristiche geometriche principali della linea di ormeggio (punto di contatto sul fondo del mare della linea e coordinate di ancoraggio proposte), riportate in Tabella 3.8, considerando lo stesso sistema di contatto della linea di ormeggio alla piattaforma (passacavo - Fairlead), i (primi) punti in cui le cime di ormeggio toccano il fondale (in equilibrio, condizione indisturbata) (Touchdown) e vengono indicati i punti di ancoraggio (Anchor).

In Figura 32 è riportato il grafico di una linea di ormeggio in equilibrio statico (condizioni indisturbate), nell'immagine il rettangolo grigio rappresenta la piattaforma della chiatta.



(a) Top view of the mooring system





Figura 3.6: sistema di ormeggio progettato per la piattaforma tipo chiatta con bacino di smorzamento

Parameter	Unit	Value
Mooring system type	-	Chain Catenary
Line Type	-	R3 Studless Mooring Chain
Line Breaking Strength	kN	22,286
Number of Lines	-	4
Anchor Depth	m	150
Fairlead Depth	m	+4
Dry Line Linear Density	Kg/m	685
Diameter	m	0.333
Line length	m	600
Horizontal Restoring Stiffness (static analysis)	kN/m	6000
Pre-tension force	kN	2383

Tabella 3.6: proprietà del sistema di ormeggio per la piattaforma tipo chiatta con bacino di smorzamento

Nella tabella 3.7 sono riportati i coefficienti idrodinamici utilizzati per calcolare la massa aggiunta e le forze viscose che agiscono sulla linea di ormeggio.

Mooring Line Coefficients	Relative to Chain Nom Diameter	nal Relative to Volume-Equivalent Diameter
Normal Added Mass	1	0.82
Tangential Added Mass	1	0.27
Normal Drag	2	1.11
Tangential Drag	1.15	0.20

Tabella 3.7: coefficienti di massa aggiunta e di trascinamento della linea di ormeggio

Nella tabella 3.8 si individuano, considerando lo stesso sistema di coordinate utilizzato per la piattaforma, le posizioni dei punti di attacco della linea di ormeggio alla piattaforma (i.e. fairlead), i (primi) punti in cui le



linee di ormeggio toccano il fondo marino (in equilibrio, in condizioni indisturbate) (i.e. touchdown) e i punti di ancoraggio.

Nella figura 3.7 è riportato il grafico di una linea di ormeggio in equilibrio statico (condizioni non perturbate), nell'immagine il rettangolo grigio rappresenta la piattaforma tipo chiatta.

	X (m)	Y (m)	Z (m)	
Fairlead1	-28.1	-28.1	4	
Fairlead2	28.1	-28.1	4	
Fairlead3	28.1	28.1	4	
Fairlead4	-28.1	28.1	4	
Touchdown1	-218.452	-218.452	-150	
Touchdown2	218.452	-218.452	-150	
Touchdown3	218.452	218.452	-150	
Touchdown4	-218.452	218.452	-150	
Anchor1	-415.748	-415.748	-150	
Anchor2	415.748	-415.748	-150	
Anchor3	415.748	415.748	-150	
Anchor4	-415.748	415.748	-150	

 Tabella 3.8:Posizione dei passacavi (Fairleads), dei punti di contattato sul fondale (touchdown), e delle ancore

 (Anchors)



Figura 3.7: Configurazione statica di una linea di ormeggio per tipo chiatta con bacino di smorzamento. MLV -= Mean Waterline Level (livello medio dl mare)



3.3.2 Analisi nel dominio del tempo per chiatte con turbina eolica e sistema di ormeggio

Come indicato nella sezione 3.1, le analisi nel dominio del tempo vengono eseguite considerando l'intero sistema, cioè la piattaforma tipo chiatta con bacino di smorzamento, il sistema di ormeggio sviluppato nella sezione 3.3.1 e la turbina eolica IEA 15 MW.

La prima analisi condotta è la cosiddetta "analisi di decadimento", dove non vengono considerati né il vento, né l'onda e nemmeno la corrente, ma bensì la piattaforma viene inizialmente spostata di una certa quantità per ciascun grado di libertà (uno per volta ottenendo 6 simulazioni) e la risposta del sistema viene utilizzata per valutare i periodi naturali della piattaforma.

La seconda analisi considera invece le condizioni del vento e delle onde. Per realizzare la certificazione della struttura sono da considerare un gran numero di casi di carico, ma, in questa fase preliminare, è stato considerato solo il caso di carico peggiore, con onde del periodo di ritorno di 50 anni (massimi carichi d'onda) e velocità del vento nominale (massimi carichi aerodinamici), provenienti dalla stessa direzione (allineato con l'asse x).

La definizione del sistema di coordinate per questa analisi nel dominio temporale è illustrata nella figura 3.8. Il punto di origine è la proiezione del punto centrale della base della torre sul livello medio della linea di galleggiamento.



Figura 3.8: Definizione del sistema di riferimento utilizzata per le analisi OpenFAST della piattaforma tipo chiatta con bacino di smorzamento.



3.3.2.1 Analisi di decadimento

Prima di poter realizzare l'analisi dinamica, vanno eseguite le analisi di decadimento libero per calcolare il periodo naturale dell'intero sistema. I risultati corrispondenti sono riportati nella tabella 3.9. Come si può vedere, questi valori sono prossimi ai valori stimati con l'analisi precedente (Tabella 2.4), che risultano, pertanto, verificati e affinati.

Degree of freedom	Natural period [s]	
Surge	110.3	
Sway	110.3	
Heave	11.4	
Roll	17.8	
Pitch	18.0	
Yaw	75	

Figura 3.9: Periodi naturali dell'intera piattaforma tipo chiatta

3.3.2.2 Analisi dinamica considerando gli effetti di vento e onde

Come accennato in precedenza, si considera la condizione di carico nello scenario peggiore, che corrispondente alle condizioni di onda stimate con tempo di ritorno pari a 50 anni e una velocità del vento corrispondente alla velocità del vento nominale della turbina eolica, si ha quindi, $H_s = 6,36$ m e $T_p=8.24$ s per le onde e per il vento una velocità pari a $V_w=10.59$ m/s. Sia il vento che le onde sono considerante in direzione x positiva. La corrente non è considerata in questa analisi.

I movimenti della piattaforma, rappresentati dallo spostamento del punto di origine nelle tre direzioni, abbrivio (surge), beccheggio (pitch) e sussulto (heave), sono stati tracciati nei grafici contenuti nelle figure che seguono considerando un tempo di simuzione t = 3000 s, nella tabella sono inoltre riportati, per ciascun parametro di spostamento, i valori minimi, massimi e della deviazione standard (calcolati escludendo il periodo transitorio iniziale di circa 500 secondi).

DOF Motions	Surge	Pitch	Heave
Maximum value	19.8	3.3	3.0
Mean value	14.6	2.4	0.9
Minimum value	8.7	1.9	-1.3
Standard deviation	2.14	0.21	0.66

Figura 3.10:Tabella 3.5: Valori massimi, medi, minimi e della deviazione standard dei moti di abbrivio (surge), beccheggio (pitch) e sussulto (heave)

Lo spostamento massimo in abbrivio è di 19,77 m e risulta inferiore al 15% della profondità dell'acqua, si soddisfa pertanto il criterio considerato nella sezione 3.1.





(b) Pitch motion for barge platform





(c) Heave motion for barge platform

Figura 3.11: movimenti di abbrivio (a). (surge), beccheggio (b) (pitch) e sussulto (c) (heave) della piattaforma tipo chiatta

In figura 3.12 si mostra l'andamento temporale della forza di tensione in corrispondenza del passacavo della linea di ormeggio. Dalla figura si può osservare che la forza di tensione massima non supera il valore limite consentito. Pertanto, il sistema di ormeggio progettato risulta adeguato per la piattaforma proposta.



Figura 3.12:forze di tensione in corrispondenza dei passacavi delle linee di ormeggio (le linee di ormeggio sono numerate nella figura 3.6 a))



4 CONCLUSIONI

In conclusione, sono stati eseguiti due progetti preliminari per due sottostrutture galleggianti di aerogeneratore, a supporto dell'aerogeneratore IEA da 15 MW, e tenendo conto delle condizioni meteo oceaniche della località prescelta.

Le due sottostrutture sono:

- Un semisommergibile, graficamente simile a quello di Figura 2.3, le cui dimensioni principali sono riportate in Tabella 2.1
- Una chiatta con bacino interno di smorzamento, graficamente simile a quella di Figura 2.7, le cui dimensioni principali sono riportate in Tabella 2.3

Queste sottostrutture sono state progettate e verificate adottando un approccio multi-fidelity, partendo dall'analisi quasi-statica nel dominio della frequenza, per esplorare rapidamente lo spazio progettuale ed eseguire le necessarie analisi parametriche, verificando poi questi progetti secondo un modello aero-idro-servo-elastico accoppiato di analisi dinamiche, non lineari.

4.1 CONFIGURAZIONE TIPO SEMISOMMERGIBILE

È stata progettata la sottostruttura di fondazione galleggiante ottenendo una configurazione in grado di soddisfare i criteri selezionati. Solo il criterio dell'angolo massimo di inclinazione inferiore a 5 gradi non risulta soddisfatto, ma, come indicato nel paragrafo "Elementi critici del progetto" il "Windfloat" è equipaggiato con un sistema dinamico di zavorra brevettato che risolve questo punto critico.

Si è inoltre stimata la massa complessiva di acciaio necessaria per costruire la struttura del Windfloat in circa 4800 t, paria circa 320 t/MW. Tale stima non considera le strutture secondarie e pertanto si ritiene che la massa strutturale finale possa essere superiore.

Si è poi realizzato il progetto preliminare del sistema di ormeggio e svolto lo studio dinamico nel dominio del tempo della sottostruttura completa di aerogeneratore ed ormeggi. Si è così potuto verificare il comportamento della struttura complessiva accertando il rispetto di tutti i criteri indicati per il progetto dell'ormeggio considerando lo scenario peggiore rappresentato dal vento in condizionali nominali e condizioni d'onda corrispondenti al vento indicato per un periodo di ritorno di 50 anni. Si evidenzia che i risultati ottenuti nello studio non tengono conto degli effetti positivi del sistema di controllo attivo della zavorra che garantiscono un ulteriore miglioramento delle prestazioni complessive di tale configurazione.

4.2 CONFIGURAZIONE TIPO CHIATTA CON BACINO DI SMORZAMENTO

È stata progettata la sottostruttura di fondazione galleggiante ottenendo una configurazione in grado di soddisfare i criteri selezionati. La struttura progettata non rispetta i criteri del periodo naturale minimo di sussulto e dell'altezza minima del bordo libero. Come già esposto nel paragrafo "Elementi critici del progetto" tale sistema proposto dalla "BW IDEOL" beneficia dell'effetto positivo del bacino di smorzamento, sistema brevettato che dovrebbe consentire il superamento delle criticità emerse dallo studio nel dominio della frequenza svolto.

Si è inoltre stimata la massa complessiva di acciaio necessaria per costruire la struttura della Ideol in circa 6060 t, paria circa 400 t/MW.

Anche per tale configurazione si è realizzato il progetto preliminare del sistema di ormeggio e svolto lo studio dinamico nel dominio del tempo della sottostruttura completa di aerogeneratore ed ormeggi verificando il corretto funzionamento della piattaforma e degli ormeggi secondo criteri prestabiliti.



4.3 VALUTAZIONI FINALI

Entrambe le opzioni di piattaforma selezionate sono risultate adeguate sebbene, alcune criticità risultino superabili solo considerando il contributo determinante dato da specifici accorgimenti tecnici adottati dai progettisti che peraltro sono soggetti a brevetto. Nel caso del Windfloat si tratta del sistema di controllo attivo della zavorra: un sistema di controllo dell'assetto dello scafo che sposta l'acqua da una colonna all'altra per compensare i carichi medi di spinta della turbina durante il suo funzionamento. In merito si segnala che trattasi di una tecnologia utilizzata in campo nautico, che, nel caso specifico, è stata progettata per sostenere e stabilizzare la turbina eolica e rispondere alle specifiche e rilevanti sollecitazioni che ne derivano. D'altro canto, Ideol, ha adottato la soluzione tecnica del bacino interno di smorzamento (Damping Pool®) che dovrebbe risolvere le criticità emerse nello studio effettuato. Al momento, non è stato però possibile approfondire e verificare nel dettaglio tale aspetto a causa della presenza di pochi risultati pubblicati nel dominio pubblico riguardo all'efficacia dello specchio d'acqua di smorzamento.

Aldilà di questo aspetto si evidenzia inoltre che per realizzare la piattaforma proposta dalla Ideol risulta necessaria una quantità superiore di acciaio e pertanto risulta quindi più costosa. La piattaforma della Ideol risulta realizzabile anche in cemento armato; tale soluzione, ad una prima analisi, non appare vantaggiosa sia sul fronte dei costi che dal punto di vista della cantieristica da approntare all'interno dei porti esistenti.

La tecnologia Windfloat risulta supportata da un numero superiore di installazioni dimostrative, 8 piattaforme installate con aerogeneratori di potenza superiori agli 8 MW e tuttora funzionanti, caratterizzate da potenze confrontabili a quelle proposte nel presente progetto che si sommano ai progetti pilota di minore potenza realizzati e poi dismessi, mentre la chiatta con bacino di smorzamento della Ideol risulta essere installata su due impianti dimostrativi da 1 MW.

La tecnologia della BW Ideol con configurazione tipo chiatta con sistema di smorzamento risulta sicuramente una opzione valida, tecnologicamente avanzata e di grande interesse, d'altra parte, in base alle considerazioni sopra esposte, si è scelto di adottare il sistema Windfloat della Principle Power costituito da una piattaforma semisommergibile con controllo attivo della zavorra di cui sono state esposte e verificate, nei capitoli che precedono, tutte principali caratteristiche dimensionali



5 RIFERIMENTI

- [1] C. Allen et al., "Definition of the UMaine VolturnUS-S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine," Golden, CO (United States), Jul. 2020.
- [2] DNV-GL, "DNVGL-ST-0119 Floating wind turbine structures," no. July, p. 162, 2018.
- [3] D. Roddier, C. Cermelli, and A. Weinstein, "WINDFLOAT: A FLOATING FOUNDATION FOR OFFSHORE WIND TURBINES PART I: DESIGN BASIS AND QUALIFICATION PROCESS," Engineering, pp. 1–9, 2009.
- [4] F. Beyer, T. Choisnet, M. Kretschmer, and P. W. Cheng, "Coupled MBS-CFD simulation of the IDEOL floating offshore wind turbine foundation compared to wave tank model test data," Proc. Int. Offshore Polar Eng. Conf., vol. 2015-January, pp. 367–374, 2015.
- [5] Matthew Hannon, Eva Topham, James Dixon, David Mcmillan, and Maurizio Collu, "Offshore wind, ready to float? Global and UK trends in the floating offshore wind market."