

Progetto Definitivo

PARCO EOLICO OFFSHORE AL LARGO DELLE COSTE DI CIVITAVECCHIA



TYRRHENIAN WIND ENERGY

Ministero dell'Ambiente
e della Sicurezza Energetica

Ministero della Cultura

Ministero delle Infrastrutture
e dei Trasporti

*Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale
ex D.lgs. 152/2006*

*Domanda di Autorizzazione Unica
ex D.lgs. 387/ 2003*

*Domanda di Concessione Demaniale Marittima
ex R.D. 327/1942*

Relazione tecnica DIMENSIONAMENTO DELLA FONDAZIONE GALLEGGIANTE

Progetto
Dott. Ing. Luigi Severini
Ord. Ing. Prov. TA n.776

Elaborazioni
iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

RELFON

C0123SR00RELFON00a



00	Luglio 2023	Emesso per approvazione		
Rev. Est.	Data emissione	Descrizione		Cod. Ela.

Cod.:

C	0	1	2	3	S	R	0	0	R	E	L	F	O	N	0	0	a
Tipo	Num. Com.	Anno	Cod. Set.	Tip. Ela.	Prog. Ela.	Descrizione elaborato									Rev. Est.	Rev. Int.	

SOMMARIO

1. SCOPO DEL DOCUMENTO	1
2. DESCRIZIONE SINTETICA DEL PROGETTO	2
3. FONDAZIONI GALLEGGIANTI, STATO DELL'ARTE	3
4. FONDAZIONE TETRASUB®	6
4.1. Elementi costitutivi	7
4.1.1. Elementi primari	7
4.1.2. Elementi secondari	14
4.2. Ingombri e dislocamento	15
4.3. Materiali impiegati	18
4.4. Normative e regolamenti di riferimento	19
5. CARATTERISTICHE AMBIENTALI DEL SITO	20
5.1. Clima meteomarinario	20
5.1.1. Condizioni di vento	21
5.1.2. Condizioni oceanografiche	23
5.1.2.1. Stato del mare in condizioni normali (NSS)	23
Caratterizzazione vento-onda NSS	23
Caratterizzazione del moto ondoso NSS	26
Corrente marina in condizioni normali (NSS current)	26
5.1.2.2. Stato del mare in condizioni estreme (ESS)	27
Onde estreme	27
Corrente marina estrema (ECM)	28
5.1.3. Marine growth	28
5.2. Batimetria	29
6. CASI DI CARICO DI PROGETTO	30
6.1.1. Tabella di riepilogo dei DLC	30
6.1.2. Definizione dei DLC	31
7. ANALISI DI STABILITÀ	32
7.1. Configurazione del sistema	32
7.2. Metodologia di calcolo	32
7.2.1. Requisito di stabilità di una fondazione semi-immersa (DNV-ST-0119)	32
7.2.2. Momento raddrizzante e massimo momento sbandante accettabile	33
7.2.3. Momento sbandante	35
7.3. Risultati	35
7.3.1. Momento raddrizzante e massimo momento sbandante accettabile	36
7.3.2. Momento sbandante	40
7.3.2.1. Fase operativa	40

PARCO EOLICO OFFSHORE AL LARGO DELLE COSTE DI CIVITAVECCHIA PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica – Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0123SR00RELFON00a	Data emissione: Luglio 2023	Pagina II di VI

7.4.	Analisi di stabilità della fondazione	40
8.	ANALISI DINAMICA E DEI MOTI.....	42
8.1.	Software di simulazione	42
8.2.	Configurazione del sistema	42
8.2.1.	Sistemi di coordinate	42
8.2.1.1.	Sistema di coordinate globale.....	43
8.2.1.2.	Sistema di coordinate della fondazione.....	43
8.2.1.3.	Sistema di coordinate meteomarina.....	44
8.2.2.	Sistema turbina-fondazione	44
8.3.	Analisi modale.....	45
	Periodi naturali della fondazione	45
	Prima frequenza naturale del sistema torre-fondazione.....	45
8.4.	Accelerazione in testa alla torre.....	46
8.5.	Moti della fondazione.....	47
9.	ANALISI STRUTTURALE DELLA FONDAZIONE.....	48
9.1.	Criteri di progettazione.....	49
9.1.1.	Verifica allo Stato Limite Ultimo.....	49
9.1.1.1.	Verifica di snervamento.....	49
9.1.1.2.	Stato Limite Ultimo di Instabilità (Buckling).....	49
9.1.1.2.1.	Valutazione dell'instabilità dei gusci	49
	Shell buckling.....	50
	Panel ring buckling	51
9.1.1.2.2.	Valutazione dell'instabilità dei membri tubolari.....	51
9.1.1.2.3.	Fattori parziali di sicurezza	52
9.1.1.2.4.	Seed averaging.....	52
9.1.1.3.	Verifica allo Stato Limite Ultimo dei collegamenti con perni.....	54
9.1.1.4.	Verifica allo Stato Limite Ultimo delle Connessioni con iniezione di malta.....	56
9.1.2.	Verifica allo Stato Limite di Fatica	56
9.1.3.	Verifica allo Stato Limite Ultimo per Azioni Accidentali.....	57
9.1.4.	Verifica allo Stato Limite di Esercizio.....	57
9.2.	Dimensionamento strutturale.....	58
9.2.1.	Analisi di instabilità dei componenti della fondazione	58
9.2.1.1.	Carichi interni e pressione idrostatica	58
	Colonna Centrale	58
	Radiale 1	59
	Radiale 2/3.....	59
	Diagonale 1.....	60
	Diagonale 2/3.....	60
	Laterale 1/2.....	61
	Cassa di zavorra 1	61
	Cassa di zavorra 2/3.....	62

PARCO EOLICO OFFSHORE AL LARGO DELLE COSTE DI CIVITAVECCHIA PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica – Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0123SR00RELFON00a	Data emissione: Luglio 2023	Pagina III di VI

Pressione idrostatica	62
9.2.1.2. Dimensionamento e rapporti di utilizzo	63
9.2.2. Analisi delle connessioni con perno	73
9.2.2.1. Calcolo dei carichi sui perni e sulle boccole	73
9.2.2.2. Dimensionamento del collegamento e rapporti di utilizzo.....	75
9.2.3. Conclusioni	78
10. PREVENZIONE DELLA CORROSIONE.....	79
11. ASSEMBLAGGIO ED INSTALLAZIONE.....	80
12. MANUTENZIONE IN FASE OPERATIVA.....	82

PARCO EOLICO OFFSHORE AL LARGO DELLE COSTE DI CIVITAVECCHIA PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica – Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0123SR00RELFON00a	Data emissione: Luglio 2023	Pagina IV di VI

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1 – Schema concettuale dell'impianto.	2
Figura 3.1 – Tipologie di fondazioni più comuni.....	3
Figura 3.2 – Fondazione semi-immersa.....	5
Figura 3.3 – Tipologie di piattaforma galleggiante: triangolo della stabilità.....	5

PARCO EOLICO OFFSHORE AL LARGO DELLE COSTE DI CIVITAVECCHIA PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica – Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0123SR00RELFON00a	Data emissione: Luglio 2023	Pagina V di VI

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3.1 – Sfida progettuale per tipologia di fondazione. (S.Butterfield, 2007)..... 4

INDICE DELLE VOCI

DFF	Design Fatigue Factor
DLC	Design Load Case
DNV	Det Norske Veritas
ECM	Extreme Current Model
ESS	Extreme Sea State
EWM	Extreme Wind Model
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
NREL	National Renewable Energy Laboratory
RNA	Rotor Nacelle Assembly
SLA	Stato Limite Accidentale
SLF	Stato Limite di Fatica
SLU	Stato Limite Ultimo
SO	Stiesdal Offshore
WTG	Wind Turbine Generator

1. SCOPO DEL DOCUMENTO

Con il presente documento si intende descrivere la tipologia di fondazione utilizzata per supportare il sistema torre-turbina eolica ai fini del progetto per la realizzazione di un parco eolico al largo delle coste di Civitavecchia. Oltre ad una descrizione di carattere generale e dimensionale, si riportano i principi di funzionamento e si affrontano gli aspetti più sensibili della fondazione.

Il documento presenta:

- una descrizione sintetica del progetto;
 - una breve trattazione relativa alle tipologie di fondazione esistenti per il settore dell'eolico offshore;
 - una descrizione della fondazione galleggiante scelta per il presente progetto, dal punto di vista dei componenti, dei materiali, delle masse e degli ingombri;
 - una descrizione delle principali caratteristiche ambientali del sito;
 - i casi di carico di progetto impiegati per la valutazione strutturale dei componenti;
 - un'analisi di stabilità al galleggiamento per differenti condizioni di carico in fase di esercizio;
 - un'analisi dinamica del sistema in termini di analisi modale e di moti del sistema;
 - una trattazione relativa all'analisi e verifica di alcune delle strutture principali per differenti condizioni di carico (stato limite ultimo, stato limite a fatica);
 - una descrizione delle soluzioni previste per la protezione superficiale della fondazione in riferimento alla prevenzione dalla corrosione galvanica;
 - una breve descrizione delle operazioni da seguire per l'assemblaggio delle fondazioni;
 - cenni relativi alla manutenzione delle strutture in fase di esercizio.
-

2. DESCRIZIONE SINTETICA DEL PROGETTO

L'impianto di produzione eolica, a realizzarsi nel Mar Tirreno nel settore geografico sud-ovest delle coste di Civitavecchia, a oltre 20 km dalle più vicine coste laziali, garantirà una potenza nominale massima pari a 504 MW attraverso l'utilizzo di 28 aerogeneratori sostenuti da innovative fondazioni galleggianti.

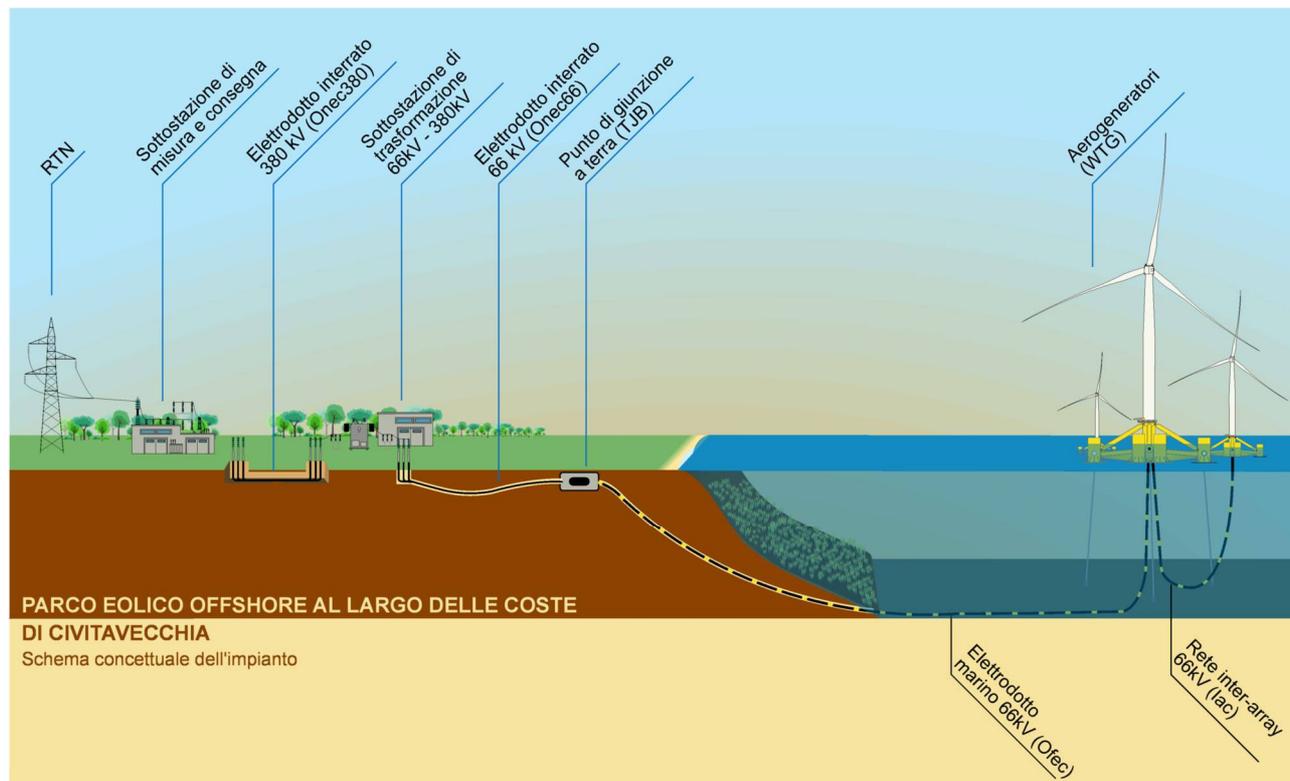


Figura 2.1 – Schema concettuale dell'impianto.

Elaborazione iLStudio.

L'impiego di questi sistemi consente l'installazione in aree marine profonde e molto distanti dalle coste, dove i venti sono più intensi e costanti e la percezione visiva dalla terraferma è estremamente ridotta, mitigando così gli impatti legati alle alterazioni del paesaggio tipici degli impianti realizzati sulla terraferma o in prossimità delle coste. La collocazione del parco, frutto di una approfondita conoscenza delle caratteristiche del sito, armonizza le risultanze di studi e consultazioni finalizzati alla migliore integrazione delle opere all'interno del contesto naturale e antropico pre-esistente.

L'opera in oggetto, nella sua completezza, si sviluppa secondo una componente a mare (sezione offshore), dedicata prevalentemente alla produzione di energia, ed una a terra (sezione onshore) destinata al suo trasporto e immissione nella rete elettrica nazionale.

Ciascun aerogeneratore (*Wind Turbine Generator – WTG*) sarà costituito da un rotore tripala con diametro fino a 255 m calettato su torre ad una quota sul livello medio mare fino a 165 m. L'energia elettrica prodotta dalle turbine alla tensione di 66 kV sarà collettata attraverso una rete di cavi marini inter-array (*Inter-array cable - Iac*) e convogliata verso la terraferma attraverso un sistema di 6 cavi marini tripolari di esportazione (*Offshore export cable - Ofec*) a 66 kV, con approdo in TOC a circa 200 m oltre la linea di costa in un punto di giunzione a terra (*Transition Junction Bay - TJB*). Da qui, previo collegamento a 66 kV (*Onshore export cable – Onec66*), l'energia sarà trasportata presso una sottostazione elettrica di trasformazione prossima al punto di giunzione, ove sarà effettuata l'elevazione della tensione nominale da 66 kV a 380 kV. Un nuovo elettrodotto interrato di esportazione a 380 kV (*Onshore export cable – Onec380*), permetterà quindi il collegamento alla nuova sottostazione di misure e consegna in prossimità della esistente stazione elettrica RTN TERNA "Aurelia" per la definitiva connessione alla Rete Nazionale.

3. FONDAZIONI GALLEGGIANTI, STATO DELL'ARTE

L'area marina individuata per la realizzazione del parco eolico è caratterizzata da profondità del fondale comprese tra ~140 m e ~470 m; lo scenario indicato mette in risalto i limiti tecnologici di una fondazione fissa che non può raggiungere dimensioni paragonabili alle suddette profondità. È dunque necessario adottare una soluzione differente che preveda l'utilizzo di una fondazione galleggiante ancorata al fondale tramite linee di ormeggio. Una maggiore complessità tecnologica permette tuttavia un gran distanziamento del parco dalla costa (~ 20 km), raggiungendo l'obiettivo di ridurre, se non quasi azzerare, l'impatto visivo dell'opera dal litorale.

Le fondazioni galleggianti preposte ad assolvere alla funzione di supporto per l'aerogeneratore possono essere di diverso tipo. Una tipica classificazione è quella effettuata in base al metodo utilizzato per garantire la proprietà di stabilità della fondazione stessa, come mostrato in Figura 3.1.

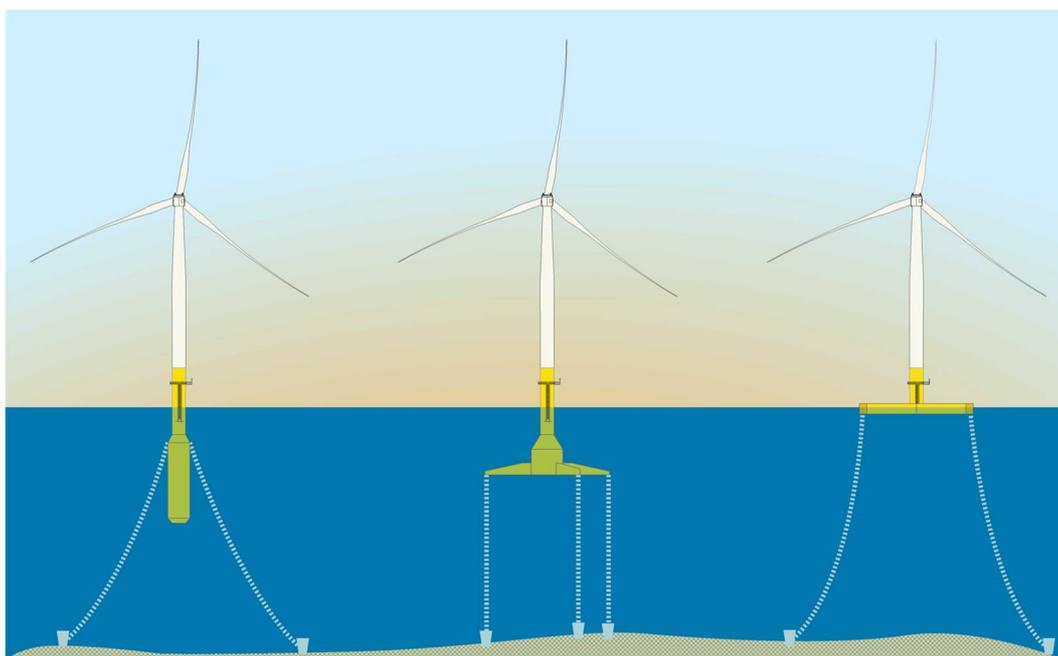


Figura 3.1 – Tipologie di fondazioni più comuni.

Elaborazione iLStudio.

Di seguito si riportano alcune caratteristiche per ogni tipologia di fondazione.

- **Fondazione ballast stabilized**, avente una struttura di forma cilindrica (a sinistra in Figura 3.1), rastremata in prossimità della linea di galleggiamento, ed usualmente ancorata al fondale tramite catenarie. Le proprietà di stabilità sono conferite da una consistente zavorra posta nella parte inferiore del galleggiante. In questo modo la posizione verticale del baricentro dell'intera struttura risulta relativamente bassa e garantisce un elevato momento raddrizzante così come un'elevata resistenza ai moti di rollio e beccheggio. La simmetria della sezione cilindrica determina moti di imbardata trascurabili rispetto a carichi idrodinamici. Lo stesso non vale per i carichi aerodinamici che si traducono nei momenti applicati alle pale dell'aerogeneratore. Le catenarie permettono infine lo stazionamento della struttura attorno al punto di progetto, contrastando i moti che avvengono sul piano orizzontale.

- **Fondazione mooring-line stabilized**, con una tipica geometria composta da una colonna centrale, a supporto della torre e dell'aerogeneratore, e da bracci laterali collegati a linee di ormeggio tese (al centro in Figura 3.1). In questo caso, le proprietà di stabilità sono garantite dalle linee di ormeggio tese che determinano l'immersione della fondazione. I moti di beccheggio e rollio risultano quindi contenuti, similmente ad una struttura a pali infissi. Ciò comporta un carico maggiore a cui è sottoposta la linea di ormeggio tesa rispetto ad una classica catenaria. In generale, il comportamento rigido della struttura si riflette sulle frequenze naturali proprie del sistema, che risultano essere alte per i moti contrastati dalle linee tese.
- **Fondazione buoyancy stabilized**, in cui rientra il classico caso di una chiatte opportunamente ancorata al fondale tramite catenaria (a destra in Figura 3.1). In questa soluzione le proprietà di stabilità sono garantite da una spinta distribuita data dal volume di carena. I moti di sussulto, beccheggio e rollio sono contrastati dalle proprietà del galleggiante e dalle sua figura di galleggiamento. Di contro, i moti orizzontali e di imbardata sono limitati dalla catenaria.

Con l'intento di evidenziare le differenze tra le soluzioni suddette, si propone la Tabella 3.1 in cui sono riportati, in riferimento a parametri specifici di valutazione, giudizi di vantaggio o svantaggio di una soluzione rispetto ad un'altra.

Tabella 3.1 – Sfida progettuale per tipologia di fondazione.
(S.Butterfield, 2007).

Design fondazione	Tipo di fondazione		
	Ballast Stabilized	Mooring Stabilized	Buoyancy Stabilized
Strumenti e metodi di progettazione	-	+	-
Ormeggi: Costi/Complessità	-	+	-
Ancoraggi: Costi/Complessità	+	-	+
Resistenza alla corrosione	+	+	-
Sensibilità alle condizioni del fondale	+	-	+
Minima impronta sul fondale	-	+	-
Sensibilità a moti ondosi	+	+	-
Impatto sul design della turbina			
Altezza turbina	-	-	+
Moti in testa torre	-	+	-
Complessità controllo	-	+	-
Massimo angolo di sbandamento	-	+	-
+ : vantaggio relativo - : svantaggio relativo			

All'interno dello spazio progettuale delimitato dalle 3 tipologie di fondazione ideali, si insediano soluzioni ibride reali, con strutture più complesse, in grado di attenuare gli svantaggi esposti. Tra queste rientra la tipologia di fondazione **semi-immersa** (semi-submersible), proposta per il presente progetto.

Una fondazione **semi-immersa** (semi-submersible) possiede comunque un considerevole volume di carena. Geometricamente questa soluzione è un assemblaggio di travi e bracci metallici collegati mediante l'utilizzo di appositi nodi, disposti generalmente secondo forme tetraedriche (base triangolare) o piramidali (base quadrata). Il contributo stabilizzante può essere garantito anche da casse di zavorra e da linee di ormeggio tese o semi tese.

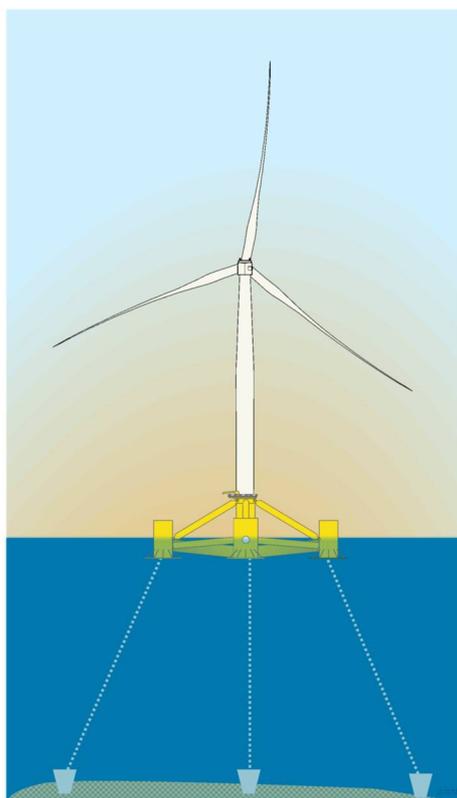


Figura 3.2 – Fondazione semi-immersa.

Elaborazione iLStudio.

Se si definisce uno spazio progettuale di tutte le possibili soluzioni, questo può essere rappresentato da un triangolo i cui vertici corrispondono ai 3 diversi modi di garantire stabilità al sistema. Si delinea così un “triangolo della stabilità” come mostrato in Figura 3.3.

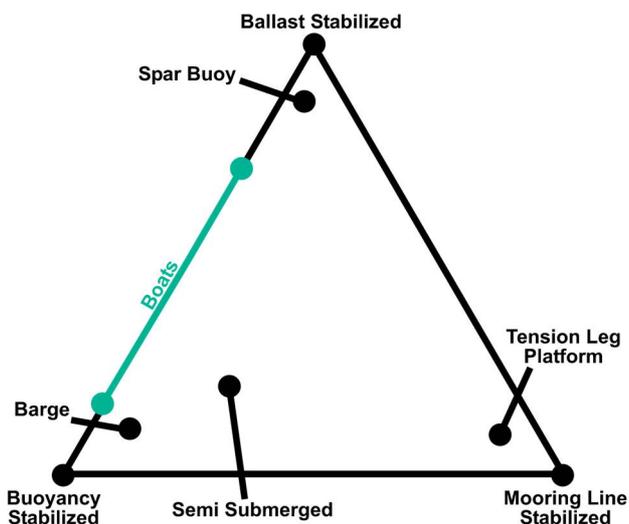


Figura 3.3 – Tipologie di piattaforma galleggiante: triangolo della stabilità.

(S.Butterfield, 2007).

Si può notare come la soluzione adottata (fondazione semi-immersa) risulti ibrida poiché è stabilizzata prevalentemente dal volume di carena, ma risente comunque del contributo stabilizzante della zavorra e delle linee di ormeggio.

PARCO EOLICO OFFSHORE AL LARGO DELLE COSTE DI CIVITAVECCHIA PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica – Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0123SR00RELFON00a	Data emissione: Luglio 2023	Pagina 6 di 8

I contenuti utili al pubblico per la Valutazione di Impatto Ambientale (art. 24 D.lgs. 152/2006) sono riportati nello Studio di Impatto Ambientale, cod. C0123YR00RELSIA00.

PARCO EOLICO OFFSHORE AL LARGO DELLE COSTE DI CIVITAVECCHIA PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica – Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0123SR00RELFON00a	Data emissione: Luglio 2023	Pagina 7 di 8

RIFERIMENTI

S.Butterfield, W. J., 2007. Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines. In: s.l.:s.n.

PARCO EOLICO OFFSHORE AL LARGO DELLE COSTE DI CIVITAVECCHIA PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica – Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0123SR00RELFON00a	Data emissione: Luglio 2023	Pagina 8 di 8

Il presente documento, composto da n. 94 fogli è protetto dalle leggi nazionali e comunitarie in tema di proprietà intellettuali delle opere professionali e non può essere riprodotto o copiato senza specifica autorizzazione del Progettista.

Taranto, Luglio 2023

Dott. Ing. Luigi Severini