



**Atti del Seminario**  
**«ENERGIA DAL MARE»**  
**Mercoledì 29 giugno 2016 – ore 14.00**  
**Aula Magna dell'Università "Parthenope", Via Acton 38 Napoli**

# Ormeaggio di strutture galleggianti per sistemi energetici in acque profonde

**Guido Benassai\*, Antonio Campanile\*\*, Vincenzo Piscopo\*\*\*, Antonio Scamardella\*\*\***

*\* Dipartimento di Ingegneria – Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*

*\*\* Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Napoli "Federico II"*

*\*\*\* Dipartimento di Scienze e Tecnologie – Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*

Relatore: Vincenzo Piscopo  
[vincenzo.piscopo@uniparthenope.it](mailto:vincenzo.piscopo@uniparthenope.it)



**C.U.G.R.I.**  
Consorzio Inter Universitario  
per la Prevenzione e Prevenzione dei Grandi Rischi  
Università di Salerno - Università di Napoli "Federico II"



## 1. Introduzione

Secondo le statistiche EWEA (The European Wind Energy Association) 2015 nella EU28 sono attualmente installati impianti eolici per una potenza complessiva nominale di 142 GW, di cui 131 GW a terra e 11 GW offshore. In particolare, nell'ultimo anno le installazioni offshore sono più che raddoppiate, in termini di potenza nominale, rispetto al 2014, con 3.02 GW installati nel solo 2015, passando dal 13% della potenza totale installata nel 2014 nel mercato EU28 al 24% di quella installata nel 2015.

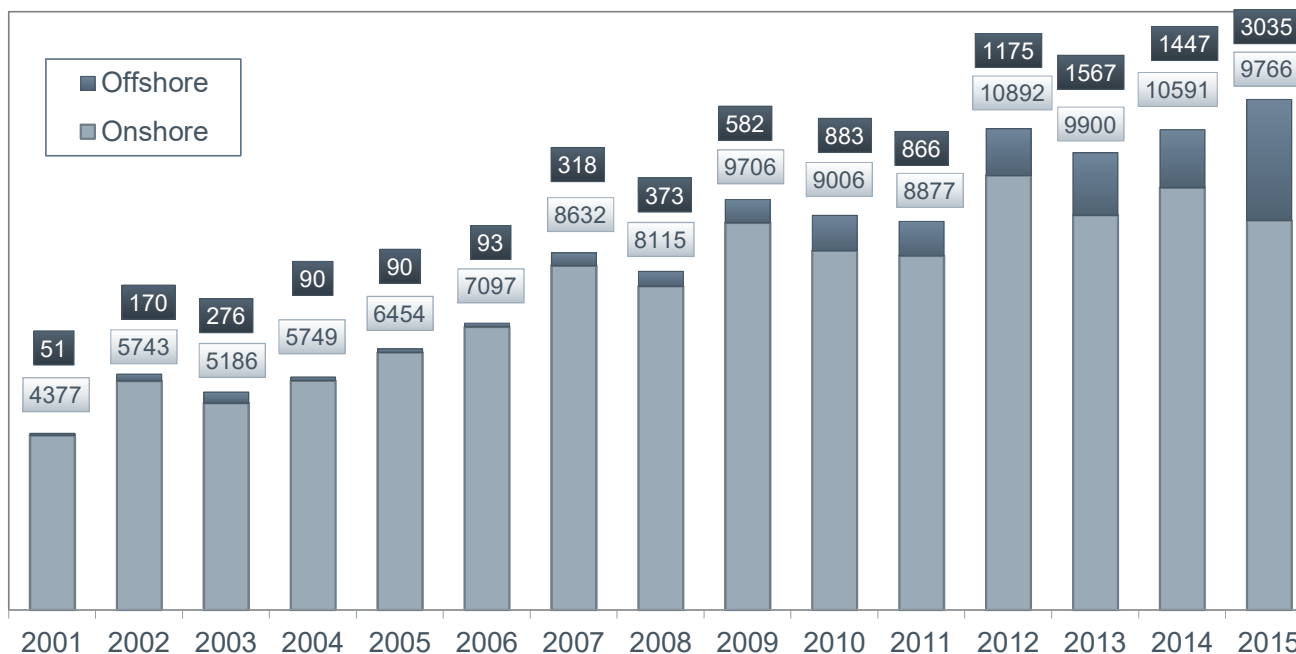
In particolare, l'energia eolica copre circa l'11.4% del fabbisogno energetico complessivo della EU28, di cui il 9.9% garantito dagli impianti onshore e l'1.5% da impianti offshore.

Consumo elettrico EU 28	Produzione elettrica onshore	Produzione elettrica offshore	Share produzione elettrica onshore	Share produzione elettrica offshore
TWh	TWh	TWh	%	%
2770	274.5	40.6	9.9	1.5

*Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016  
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*

# 1. Introduzione

Il trend di crescita delle installazioni offshore in mare risulta essere particolarmente significativo, come evidenziato dalla serie storica 2001-2015 delle installazioni eoliche onshore and offshore in MW.



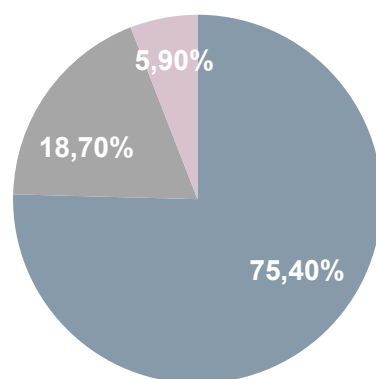
Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016  
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

## 1. Introduzione

Nell'anno 2015 si è registrato un incremento del 108.3% della potenza annua installata rispetto al 2014, con un netto incremento del numero di parchi eolici e di turbine connesse alla rete elettrica.

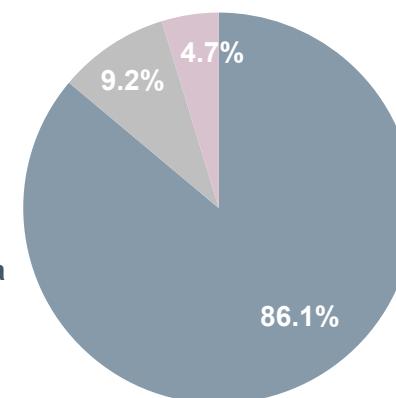
Paese	Germania	Olanda	Regno Unito	Svezia	Totale
Impianti	10	2	4	-1	<b>15</b>
Turbine	546	60	153	-5	<b>754</b>
Potenza complessiva(MW)	2282.4	180	566.1	-10	<b>3018.5</b>

La maggior parte delle installazioni sono state effettuate dalla Germania nel Mar del Nord.



■ Germania  
■ Regno Unito  
■ Olanda

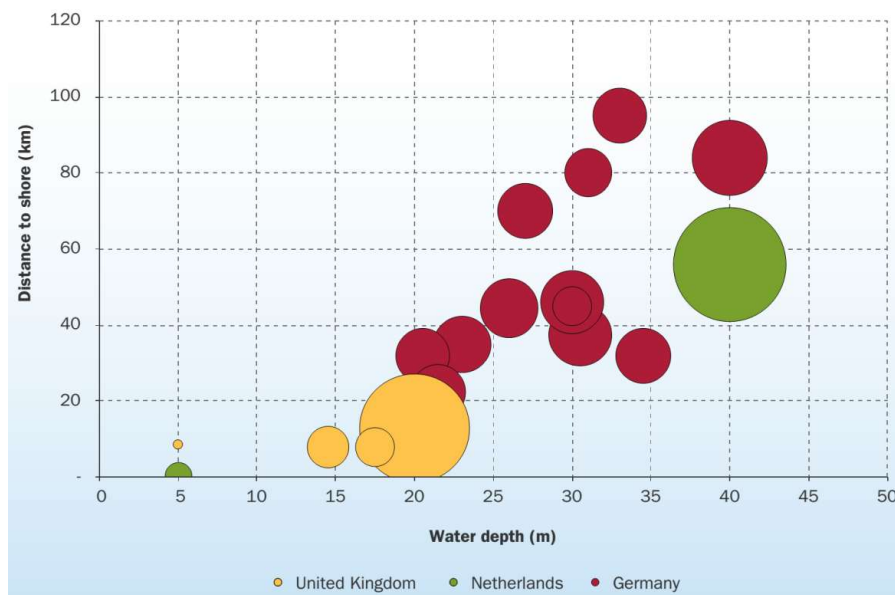
■ Mar del Nord  
■ Mar Baltico  
■ Mare di Irlanda



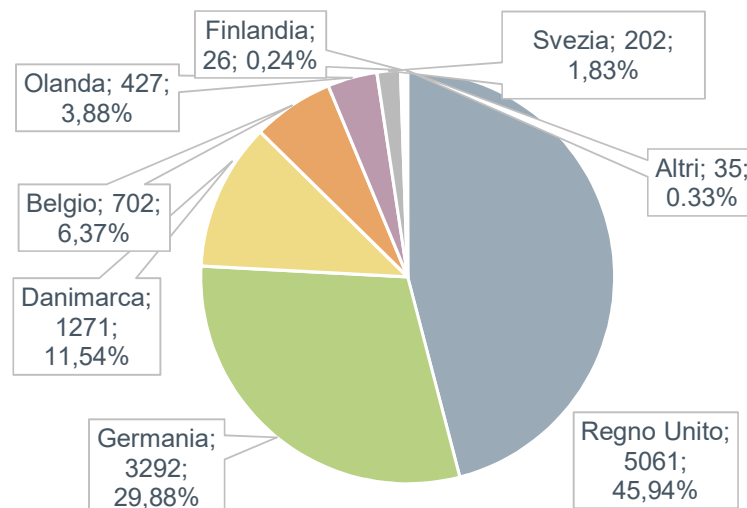
Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016  
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

# 1. Introduzione

La profondità media delle installazioni offshore nel 2015 è stata di 27.2 m, di poco superiore ai 22.4 m del 2014. La distanza media degli impianti dalla costa è stata di 43.3 km, significativamente superiore ai 32.9 km del 2014 (fonte EWEA, 2015). Germania e Regno Unito detengono i  $\frac{3}{4}$  della produzione energetica eolica offshore nella EU28.



Fonte: EWEA, 2015

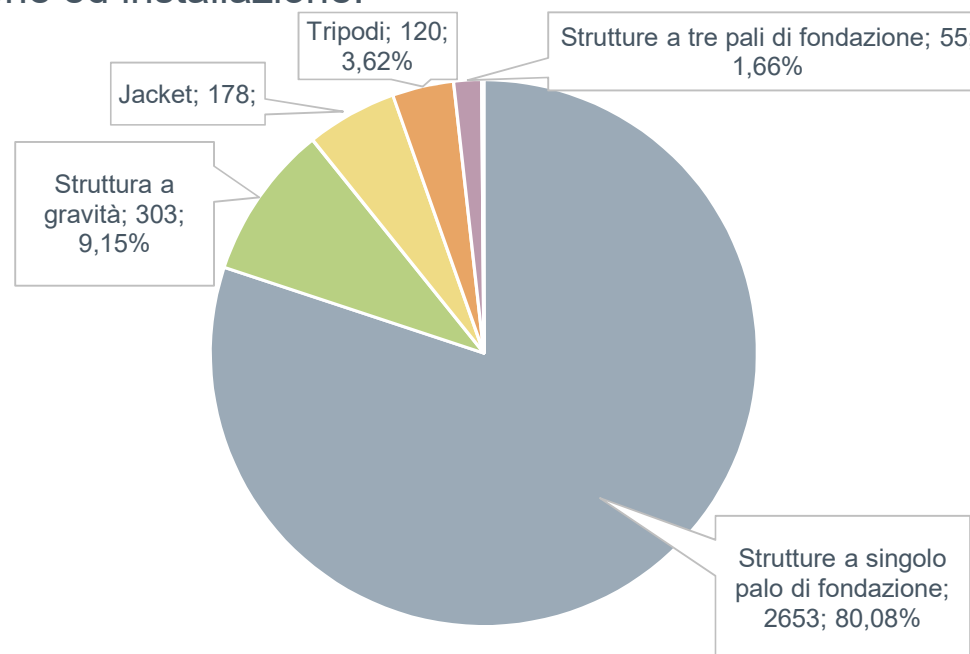


Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

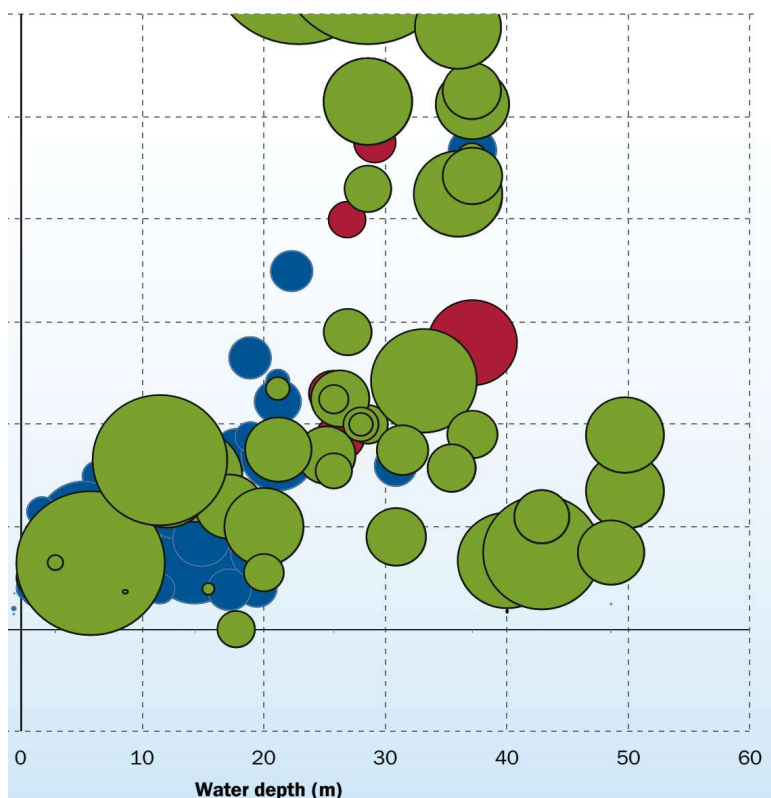
# 1. Introduzione

Con riferimento alla profondità media dei fondali nei siti di produzione, gli impianti a singolo palo di fondazione (monopile) risultano essere quelli maggiormente diffusi, anche grazie ai ridotti costi di costruzione ed installazione.



Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016  
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

# 1. Introduzione



Fonte: EWEA, 2015

L'incremento della distanza dei siti di produzione dalla costa sta spingendo le *wind farms* su fondali di profondità via via crescenti, dove risulta antieconomica l'installazione di sistemi a gravità o su pali di fondazione, risultando al contrario più conveniente l'installazione di strutture galleggianti.

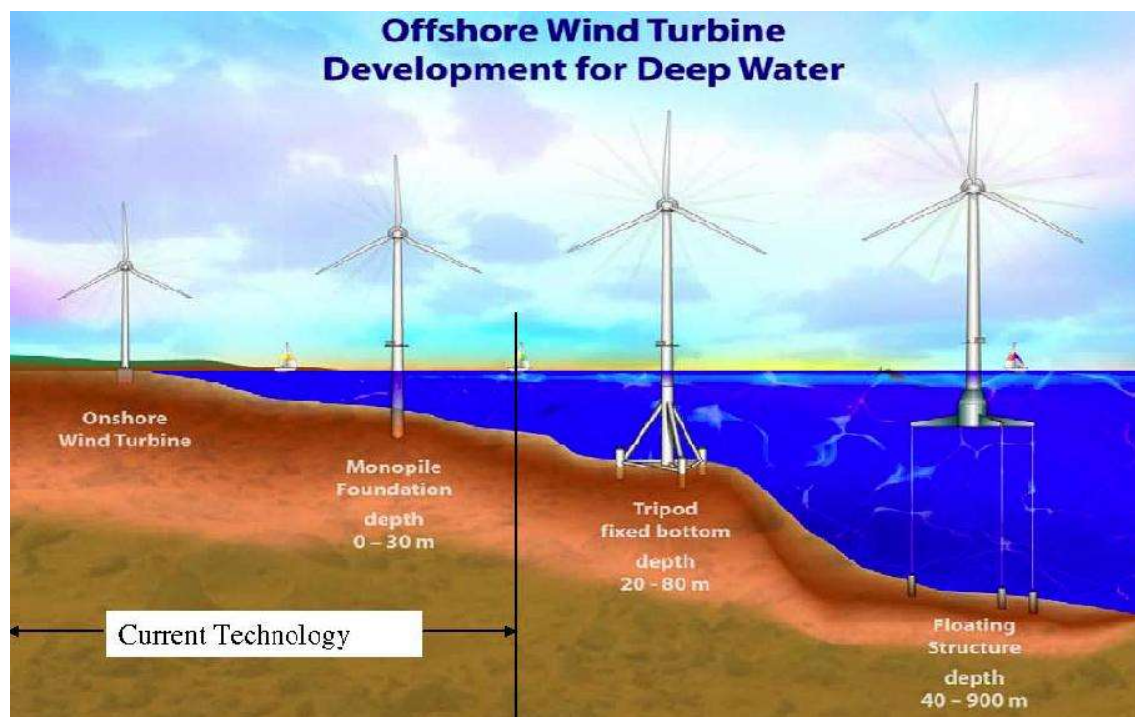


Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

# 1. Introduzione

L'incremento delle profondità di installazione delle *wind farms* richiede la progettazione di strutture galleggianti con adeguate caratteristiche di stabilità e tenuta al mare.



Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"



## 2. Condizioni operative e carichi ambientali

Il Regolamento *Design of Floating Wind Turbine Structures*, Offshore Standard DNV-OS-J103 fornisce un approccio innovativo per la progettazione integrata delle sottostrutture galleggianti di asservimento alle turbine eoliche (FOWT), introducendo il concetto di «classe ambientale» con riferimento ad aree geografiche in cui le condizioni di mare, vento, corrente e marea risultano omogenee, per facilitarne la produzione su vasta scala.

Significant wave height $H_s$ (m) in 3-hrs stationary sea state					
Return period (yrs)	1	50	100	1000	
Notation	$H_{s,1}$	$H_{s,50}$	$H_{s,100}$	$H_{s,1000}$	
Region	Southern North Sea (Egmond aan Zee)	6.3	8.1	8.4	9.5
	Danish North Sea	8.1	10.8	11.3	12.8
	Norther North Sea	11.0	14.2	14.9	16.5
	Norwegian Sea	11.6	15.4	16.0	18.0
	Barents Sea	10.0	13.6	14.5	16.3
	Sea of Japan	10.5	14.6	15.3	17.7
	North Pacific (southeast of Japan)	10.7	13.9	14.5	16.3
	East China Sea	10.2	12.9	13.4	14.9
	Yellow Sea	9.4	12.5	13.1	14.9
	Bay of Biscay	12.5	16.0	16.7	18.8
	Southern Bay of Biscay (Estaca de Bares)	9.8	12.4	12.9	14.5
	Western Mediterranean Sea (Tarragona)	5.4	6.5	6.9	7.6
	Northeast Pacific (west of Oregon)	9.0	16.1	17.4	21.5

Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

Fonte: DNV-OS-J103



## 2. Condizioni operative e carichi ambientali

Il Regolamento *Design of Offshore Wind Turbine Structures*, Offshore Standard DNV-OS-J101 fornisce le combinazioni dei carichi ambientali caratteristici d'onda, vento, corrente e marea, ognuno con assegnati periodi di ritorno, con riferimento agli stati limite:

- (i) **ULS** – Ultimate Limit State Design
- (ii) **ALS** – Accidental Limit State Design
- (iii) **FLS** – Fatigue Limit State design

e alle seguenti condizioni operative: (i) Produzione di energia, (ii) Produzione di energia in caso di avaria, (iii) Avviamento della produzione energetica, (iv) Arresto della produzione energetica, (v) Arresto di emergenza della produzione energetica, (vi) Turbina ferma, (vi) Turbina ferma in avaria.

## 2. Condizioni operative e carichi ambientali

Power production	Load case	Wind	Wave	Directionality	Current	Water level	Limit state
	1.1	NTM	NSS	Codirectional	Wind-generated	MWL	ULS
	1.2	NTM	NSS	Codirectional	---	Range between upper and lower 1-year WL	FLS
	1.3	ETM	NSS	Codirectional	Wind-generated	MWL	ULS
	1.4	ECD	NSS	Misaligned	Wind-generated	MWL	ULS
	1.5	EWS	NSS	Codirectional	Wind-generated	MWL	ULS
	1.6a	NTM	SSS	Codirectional	Wind-generated	1-year WL	ULS
	1.6b	NTM	SWH	Codirectional	Wind-generated	1-year WL	ULS

Fonte: DNV-OS-J101

<b>NTM</b>	Normal turbulence model
<b>ETM</b>	Extreme turbulence model
<b>ECD</b>	Extreme Coherent gust with Direction Change
<b>EWS</b>	Extreme Wind Shear
<b>NSS</b>	Normal Sea State
<b>SSS</b>	Severe Sea State
<b>SWH</b>	Severe Wave Height
<b>MWL</b>	Mean Water Level

*Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016  
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*

## 2. Condizioni operative e carichi ambientali

Tali condizioni operative si applicano per la progettazione di tutti gli elementi delle FOWT, inclusi i sistemi di ormeggio, per i quali le condizioni più gravose sono:

Condizione operativa	Stato limite	Vento	Onda	Corrente
Produzione energetica	ULS	Valor medio	50 anni	Valor medio
Turbina ferma	ULS	50 anni	50 anni	50 anni
Turbina ferma in condizioni di avaria	ALS	1 anno	1 anno	1 anno

Con riferimento ad una possibile installazione nel Mediterraneo centrale i carichi caratteristici di vento, onda e corrente sono i seguenti:

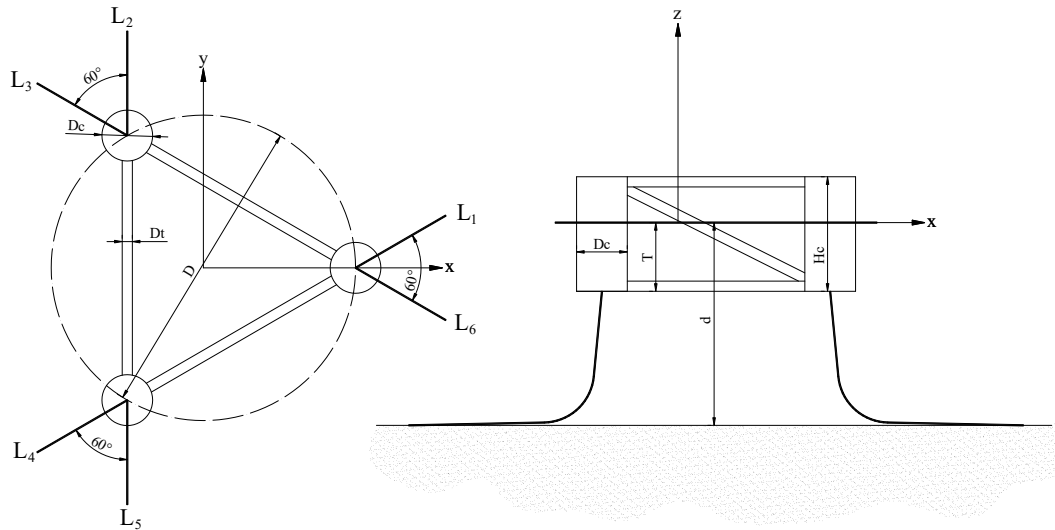
Condizione operativa	Stato limite	Vento	Onda - $\gamma_o=2.15$		Corrente
		$U_{1,10,TR}$ [m/s]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$V_c$ [m/s]
Produzione energetica	ULS	8.3*	8.6	12.2	0.2
Turbina ferma	ULS	25.0	8.6	12.2	0.5
Turbina ferma in condizioni di avaria	ALS	20.0	5.1	9.8	0.4

\*Il valor medio del vento con riferimento ad un periodo di 10 min, da combinarsi con la componente turbolenta, può essere sostituito da una raffica costante con periodo 1 min in accordo ad API, 2005.

*Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016  
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*

### 3. Modello teorico

L'analisi e l'ottimizzazione delle linee di ormeggio è realizzata con riferimento a sottostrutture galleggianti con configurazione *tri-floater* e configurazioni simmetriche con 6, 9 e 12 linee di ormeggio. La condizione di verifica, per ogni configurazione, è la seguente:



$$\gamma_{\text{mean}} T_{c,\text{mean}} + \gamma_{\text{dyn}} T_{c,\text{dyn}} < S_c$$

Stato limite	Coefficiente parziale di sicurezza	Classe di sicurezza	
		Normale	Alta
ULS	$\gamma_{\text{mean}}$	1.30	1.50
ULS	$\gamma_{\text{dyn}}$	1.75	2.20
ALS	$\gamma_{\text{mean}}$	1.00	1.00
ALS	$\gamma_{\text{dyn}}$	1.10	1.25

avendo indicato con  $T_{c,\text{mean}}$  e  $T_{c,\text{dyn}}$  le tensioni statica e dinamica nelle linee di ormeggio e con  $S_c$  il 95% del minimo carico di rottura  $Q$ .

### 3. Modello teorico

La risposta in frequenza della sottostruttura ai carichi d'onda è ottenuta dalla risoluzione delle equazioni accoppiate dei moti di abbrivio e beccheggio (deriva e rollio):

$$(m + a_{11})\ddot{x} + b_{11}\dot{x} + C_{surge}x = X \quad (mk_{yy}^2 + a_{55})\ddot{\theta} + b_{55}\dot{\theta} + \Delta gGM_L \theta = M$$

Le forze d'onda sui cilindri sono calcolate mediante l'equazione di Morison:

$$X_{cyl} = \rho C_M \pi \frac{D_c^2}{4} \int_{-T}^0 \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad ; \quad M_{cyl} = \rho C_M \pi \frac{D_c^2}{4} \int_{-T}^0 (z - z_G) \frac{\partial u}{\partial t} dz$$

nell'ipotesi di applicabilità della teoria di Airy:  $\frac{\partial u}{\partial t} = \omega^2 c_a \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t)$

Il coefficiente di inerzia  $C_M$  è, infine, determinato in accordo a Mac Camy e Fuchs:

$$C_M = \frac{4}{\pi \left(k \frac{D_c}{2}\right)^2} \cdot \frac{Y_1' \left(k \frac{D_c}{2}\right) + i J_1' \left(k \frac{D_c}{2}\right)}{\left[ J_1' \left(k \frac{D_c}{2}\right) \right]^2 + \left[ Y_1' \left(k \frac{D_c}{2}\right) \right]^2}$$

### 3. Modello teorico

I carichi alle basse frequenze agenti sulla sottostruttura sono determinati in accordo a Longuet Higgins:

$$F_d = 3\rho g D_c \int_0^\infty R^2(\omega) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right) S_\zeta(\omega) d\omega$$

avendo indicato con  $S_\zeta(\omega)$  lo spettro del mare e con  $R(\omega)$  il coefficiente di riflessione:

$$R^2(\omega) = \frac{4}{\pi^2 (kD_c/2)^3} \sum_{n=0}^{\infty} \left[1 - \frac{n(n+1)}{(kD_c/2)^2}\right]^2 \frac{1}{(J_n'^2 + Y_n'^2)(J_{n+1}'^2 + Y_{n+1}'^2)}$$

In mare irregolare lo spettro del moto in bassa frequenza della sottostruttura galleggiante è determinato in accordo a Newman:

$$S_d(\mu) = 8(\rho g D_c)^2 \int_0^\infty R^4\left(\omega + \frac{\mu}{2}\right) \left(1 + \frac{2k'd}{\sinh 2k'd}\right)^2 S_\zeta(\omega) S_\zeta(\omega + \mu) d\omega$$

## 4. Dutch Tri-floater

La sottostruttura galleggiante Dutch Tri-floater (Bulder et al., 2002) accoppiata ad una turbina NREL da 5MW di potenza nominale è stata assunta come riferimento per l'ottimizzazione del sistema di ormeggio.



Fonte: Bulder, 2002

Diametro delle colonne	8m
Altezza delle colonne	24m
Distanza tra i centri delle colonne	68m
Immersione di progetto	12m
Lightship	1150t
Acqua di zavorra	561t
Dislocamento di progetto	2480t
Altezza del centro di massa dalla B.L.	27.6m
Altezza del centro di carena dalla B.L.	5.3m
Raggio longitudinale e trasversale di inerzia	40m

Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"





## 5. Sistemi di ormeggio con pattern uniforme

L'ottimizzazione del sistema di ormeggio è realizzata per una possibile installazione di un parco eolico nel Mediterraneo centrale, assumendo come sottostruttura il *Dutch Tri-floater* con la turbina NREL 5 MW, con riferimento a:

- 6, 9 e 12 linee di ormeggio con configurazione a catenaria;
- catene o cavi in acciaio ad elevata resistenza;
- profondità del fondale compresa tra 50 e 300 m;
- spostamento massimo della sottostruttura di 10 m.

Per ogni configurazione sono determinati, mediante procedura iterativa, il diametro della linea e la sua geometria, definita dal rapporto  $S/d$  (lunghezza di linea/profondità), che consentono di minimizzare il peso del sistema di ormeggio e dunque il suo costo, ad esso direttamente proporzionale.

Per ogni configurazione sono esaminate quattro diverse condizioni operative limite, con riferimento alla turbina in funzione e ferma. Nel secondo caso gli stati limite ALS-1 e ALS-2 si riferiscono alla possibile rottura di una linea di ormeggio nel piano longitudinale e trasversale della sottostruttura.

*Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016*

*Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*

## 5. Sistemi di ormeggio con pattern uniforme

Si riportano di seguito i sistemi di ormeggio di peso minimo realizzati mediante catene con traversino ad elevata resistenza per un sito di installazione nel Mediterraneo Centrale.

Peso catene (t) – ormeggio a 6 linee					
d (m)	S/d	Power	Turbina ferma		
		ULS	ULS	ALS-1	ALS-2
50	4.42	826	614	614	917
100	5.90	633	459	555	1209
150	5.96	683	462	n/f	n/f
200	5.22	798	539	n/f	n/f
250	4.70	1022	649	n/f	n/f
300	4.26	1193	795	n/f	n/f

Peso catene (t) – ormeggio a 9 linee					
d (m)	S/d	Power	Turbina ferma		
		ULS	ULS	ALS-1	ALS-2
50	5.67	811	589	472	316
100	6.61	643	447	417	284
150	5.78	704	506	543	436
200	5.30	809	575	809	711
250	4.79	973	651	1355	1355
300	4.34	1193	820	n/f	n/f

Peso catene (t) – ormeggio a 12 linee					
d (m)	S/d	Power	Turbina ferma		
		ULS	ULS	ALS-1	ALS-2
50	5.02	818	612	452	341
100	6.43	654	465	366	335
150	6.11	706	517	474	393
200	5.35	825	603	603	505
250	4.83	1002	683	804	683
300	4.30	1228	862	1309	1075

Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

## 5. Sistemi di ormeggio con pattern uniforme

Si riportano di seguito i sistemi di ormeggio di peso minimo realizzati mediante cavi in acciaio ad elevata resistenza per un sito di installazione nel Mediterraneo Centrale.

Peso cavi in acciaio (t) – ormeggio a 6 linee					
d (m)	S/d	Power	Turbina ferma		
		ULS	ULS	ALS-1	ALS-2
50	n/f	n/f	n/f	n/f	n/f
100	n/f	n/f	n/f	n/f	n/f
150	7.89	460	316	n/f	n/f
200	8.70	464	322	n/f	n/f
250	10.06	466	318	n/f	n/f
300	9.59	457	299	n/f	n/f

Peso cavi in acciaio (t) – ormeggio a 9 linee					
d (m)	S/d	Power	Turbina ferma		
		ULS	ULS	ALS-1	ALS-2
50	n/f	n/f	n/f	n/f	n/f
100	n/f	n/f	n/f	n/f	n/f
150	8.99	444	295	540	496
200	9.01	465	320	663	634
250	10.36	460	327	794	719
300	8.93	476	338	1234	n/f

Peso cavi in acciaio (t) – ormeggio a 12 linee					
d (m)	S/d	Power	Turbina ferma		
		ULS	ULS	ALS-1	ALS-2
50	n/f	n/f	n/f	n/f	n/f
100	8.89	474	329	436	363
150	9.38	446	292	446	355
200	8.63	463	326	504	409
250	9.93	468	331	588	468
300	9.31	470	328	662	527

Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

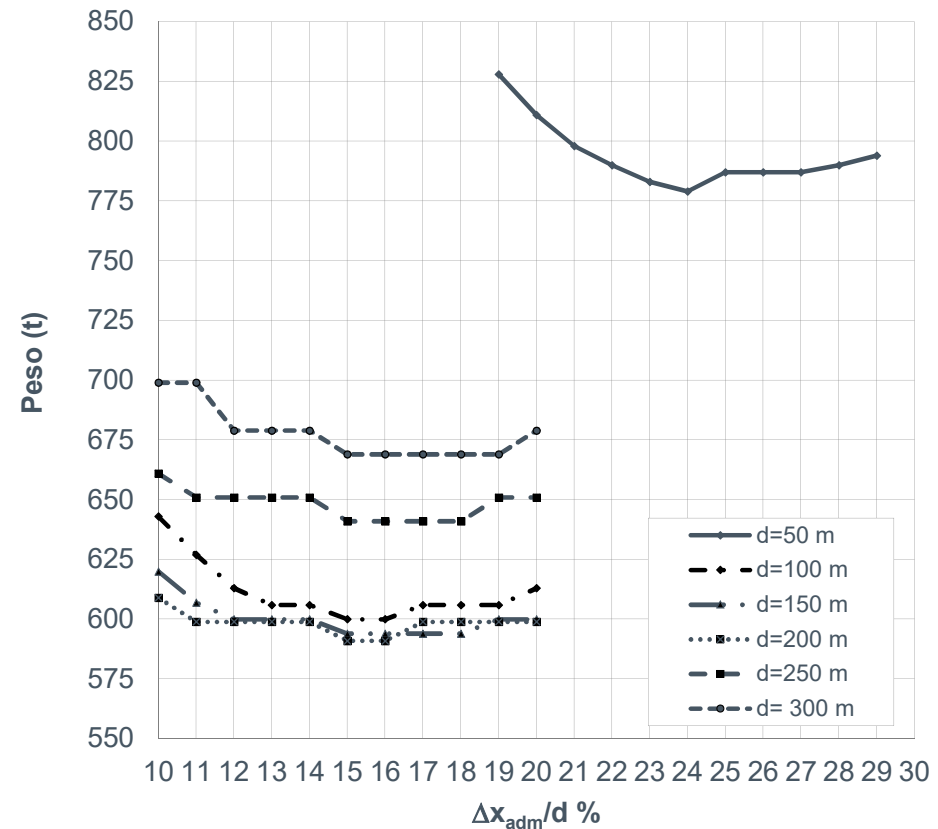
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

## 5. Sistemi di ormeggio con pattern uniforme

Dai risultati ottenuti si evidenzia che:

- La configurazione a 6 linee è preferibile in bassi fondali fino a 50 m;
- La configurazione a 9 linee è preferibile su fondali compresi tra 50 e 200 m;
- La configurazione a 12 linee risulta la migliore su alti fondali, oltre 200 e fino a 300 m.

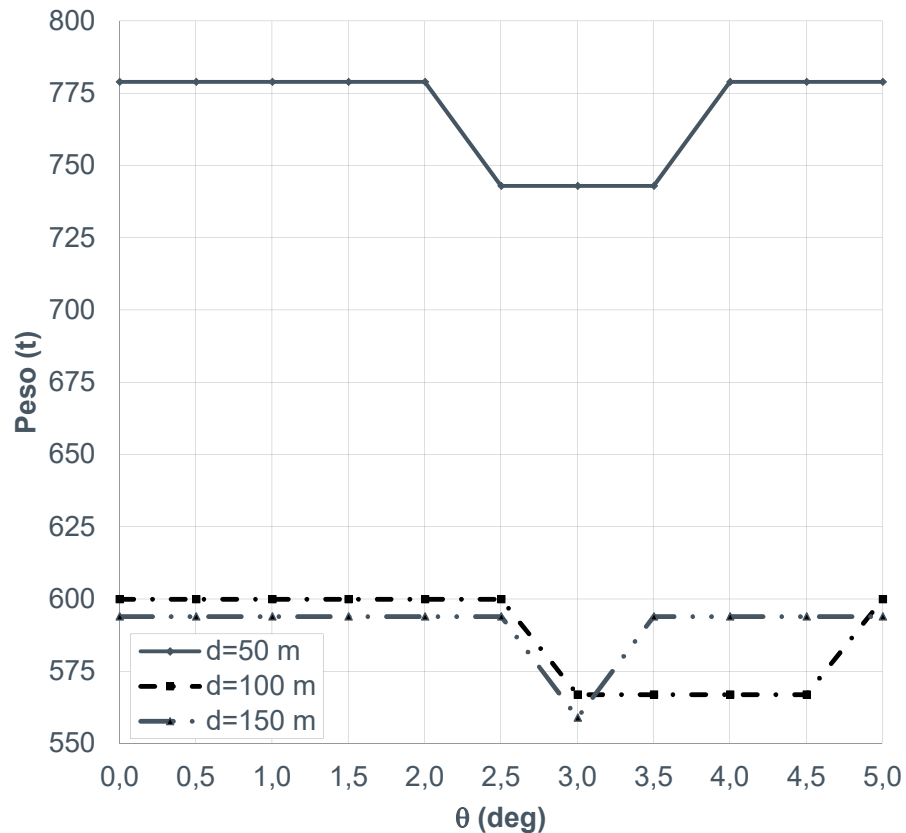
Una ulteriore riduzione del peso delle linee di ormeggio può essere ottenuta variando lo spostamento massimo ammissibile della sottostruttura o, in alternativa, realizzando configurazioni asimmetriche in funzione della polare dei carichi d'onda relativa al sito di installazione.



Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

## 5. Sistemi di ormeggio con pattern uniforme

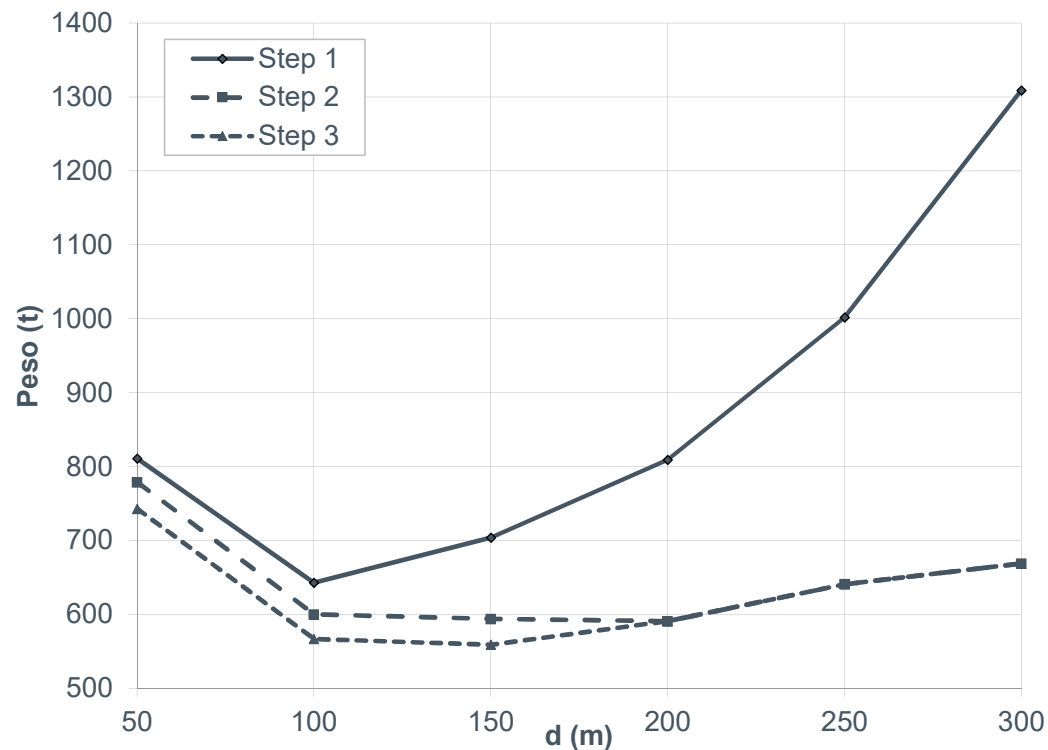


Su bassi fondali, fino a 150 m, una ulteriore (modesta riduzione) del peso delle linee di ormeggio, può essere realizzata riducendo l'angolo di inclinazione delle linee rispetto al piano di simmetria, così da aumentare la rigidezza del sistema di ormeggio nella direzione del moto di abbrivio. Tale effetto non è significativa su alti fondali, oltre 150 m.

Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

## 5. Sistemi di ormeggio con pattern uniforme



Si riporta di seguito la distribuzione del peso delle linee di ormeggio, in funzione della profondità  $d$  del fondale, con riferimento ai 3 step successivi della procedura di ottimizzazione:

- Step 1: rapporto  $S/d$ ;
- Step 2: spostamento ammissibile della sottostruttura;
- Step 3: angolo di incidenza delle linee di ormeggio rispetto al piano longitudinale di simmetria.

## 6. Sistemi di ormeggio con pattern non uniforme

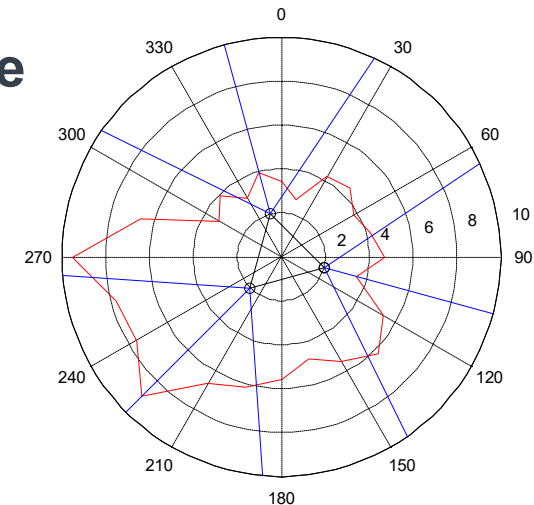
Una ulteriore significativa riduzione del peso complessivo delle linee di ormeggio può essere realizzata ricorrendo a sistemi con pattern non uniforme, in funzione della distribuzione polare dei carichi d'onda del sito di produzione, incrementando la rigidità delle linee di ormeggio nella direzione caratterizzata dai massimi carichi.

I due diagrammi polari riportano due possibili configurazioni delle linee di ormeggio per un sito di produzione nel Mediterraneo centrale:

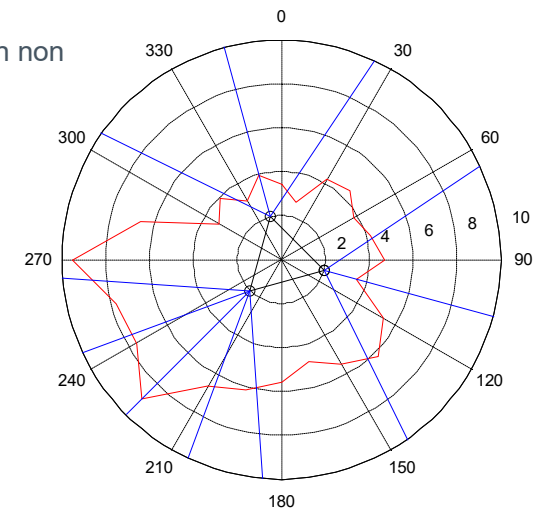
- (i) Ormeggio a 9 linee con pattern uniforme;
- (ii) Ormeggio a 11 linee con pattern non uniforme.

Le linee in rosso indicano la distribuzione polare dei carichi d'onda in termini di altezza significativa con periodo di ritorno di 50 anni.

(i) 9 linee con pattern uniforme



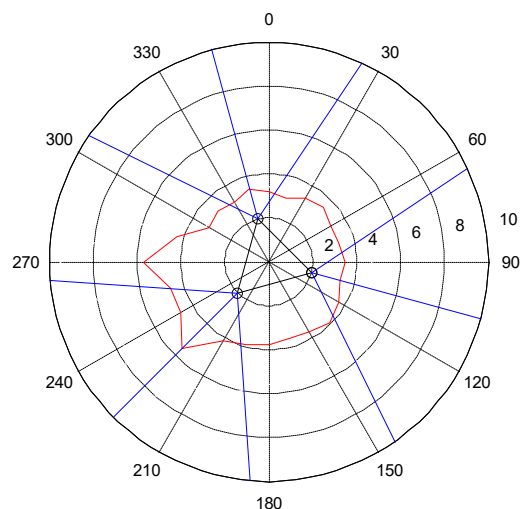
(ii) 11 linee con pattern non uniforme



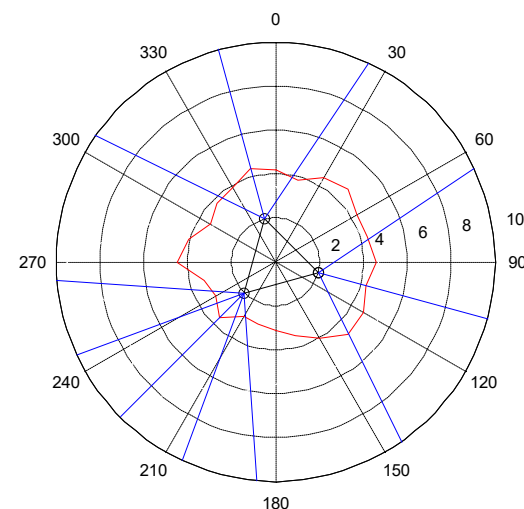
## 6. Sistemi di ormeggio con pattern non uniforme

Con riferimento alla distribuzione polare dei carichi d'onda precedentemente esaminata, il peso minimo delle linee di ormeggio richiesto per la verifica delle condizioni operative della sottostruttura galleggiante durante le fasi di produzione e arresto della turbina dipende significativamente dalla configurazione uniforme (9 linee) e non uniforme (11 linee) del sistema di ormeggio.

Le seguenti distribuzioni polari riportano in rosso il peso minimo delle linee di ormeggio in  $10^2$  t, con riferimento alle due suddette configurazioni e su un fondale di 100 m.



(i) 9 linee con pattern uniforme



(ii) 11 linee con pattern non uniforme

Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016

Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"



## 6. Sistemi di ormeggio con pattern non uniforme

Distribuzione polare dei carichi d'onda e dimensionamento delle linee di ormeggio - 9 linee con pattern uniforme

$\theta$ (deg)	$H_{s,50y}$ (m)	$T_{p,50y}$ (s)	S/d (---)	$D_v$ (m)	M - $d_c$ (t) - (mm)	w (Kg/m)	Q (kN)	T (kN)	$E_e$ (GPa)
0	3.39	8.91	6.42	615	316 - 50	54.75	2230	1134	93.78
30	4.20	9.60	6.27	600	334 - 52	59.22	2403	1176	92.72
60	3.84	9.31	6.14	586	327 - 52	59.22	2403	1128	92.72
90	4.71	9.99	6.55	629	349 - 52	59.22	2403	1281	92.72
120	5.35	10.45	6.39	612	367 - 54	63.86	2580	1315	91.66
150	5.49	10.54	6.46	620	371 - 54	63.86	2580	1339	91.66
180	5.59	10.61	6.54	654	376 - 54	63.86	2580	1373	91.66
210	6.67	11.29	6.30	603	417 - 58	73.67	2953	1471	89.54
240	7.61	11.82	6.50	623	461 - 60	78.84	3147	1674	88.48
<b>270</b>	<b>9.53</b>	<b>12.78</b>	<b>5.90</b>	<b>563</b>	<b>570 - 70</b>	<b>107.31</b>	<b>4196</b>	<b>1887</b>	<b>83.18</b>
300	3.25	8.78	6.35	608	313 - 50	54.75	2230	1113	93.78
330	3.09	8.63	6.34	608	313 - 50	54.75	2230	1107	93.78
360	3.39	8.91	6.42	615	316 - 50	54.75	2230	1134	93.78

Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016  
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

## 6. Sistemi di ormeggio con pattern non uniforme

Distribuzione polare dei carichi d'onda e dimensionamento delle linee di ormeggio – 11 linee con pattern non uniforme

$\theta$ (deg)	$H_{s,50y}$ (m)	$T_{p,50y}$ (s)	S/d (---)	$D_v$ (m)	M - $d_c$ (t) - (mm)	w (Kg/m)	Q (kN)	T (kN)	$E_e$ (GPa)
0	3.39	8.91	6.40	614	417 - 52	54.75	2221	1127	92.72
30	4.20	9.60	6.32	605	444 - 54	59.22	2393	1190	91.66
60	3.84	9.31	6.63	636	432 - 52	59.22	2403	1314	92.72
90	4.71	9.99	6.54	627	459 - 54	59.22	2393	1273	91.66
<b>120</b>	<b>5.35</b>	<b>10.45</b>	<b>6.11</b>	<b>584</b>	<b>461 - 56</b>	<b>63.86</b>	<b>2570</b>	<b>1202</b>	<b>90.60</b>
150	5.49	10.54	6.14	586	400 - 52	63.86	2591	1216	92.72
180	5.59	10.61	6.17	590	314 - 46	63.86	2622	1224	95.90
210	6.67	11.29	6.18	591	288 - 44	73.67	3037	1420	96.96
240	7.61	11.82	6.17	590	314 - 46	78.84	3237	1511	95.90
270	9.53	12.78	5.93	566	448 - 56	107.31	4319	1908	90.60
300	3.25	8.78	6.16	589	342 - 48	54.75	2239	1049	94.84
330	3.09	8.63	6.42	615	386 - 50	54.75	2230	1134	93.78
360	3.39	8.91	6.40	614	417 - 52	54.75	2221	1127	92.72

Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016  
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"



**C.U.G.R.I.**  
Consorzio Inter-Universitario  
per la Prevenzione e Prevenzione dei Grandi Rischi  
Università di Salerno - Università di Napoli "Federico II"



## 7. Conclusioni

Dall'analisi effettuata per un sito di produzione nel Mediterraneo Centrale si evidenzia che

- La configurazione a 6 linee è preferibile in bassi fondali fino a 50 m;
- La configurazione a 9 linee è preferibile su fondali compresi tra 50 e 200 m;
- La configurazione a 12 linee risulta la migliore su alti fondali, oltre 200 e fino a 300 m.

Da una analisi preliminare, ulteriori significative riduzioni di peso possono essere ottenute mediante sistemi di ormeggio con pattern non uniformi. Con riferimento ad un fondale di 100 m e ad un costo unitario delle catene di 2.875 k€/t (Berthelsen et al., 2012), il costo di un sistema di ormeggio a 9 linee con pattern uniforme è stimato in 1638.75 k€, mentre quello di un sistema a 11 linee con pattern non uniforme è di 1351.25 k€, con un risparmio di circa il 17%.

A tale risparmio vanno aggiunti i costi di installazione di n°2 linee di ormeggio e n°2 ancore ad elevato potere ancorante. Tuttavia è possibile ritenere che tale incremento di costo sia ampiamente compensato dal risparmio di 287.50 k€. Infine, si rammenta che anche a parità di costo il sistema di ormeggio a 11 linee garantirebbe, comunque, un più elevato standard di sicurezza dell'impianto, offrendo una maggiore ridondanza in caso di failure di una linea.

*Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016*

*Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*



**C.U.G.R.I.**  
Consorzio Inter Universitario  
per la Prevenzione e Prevenzione dei Grandi Rischi  
Università di Salerno - Università di Napoli "Federico II"



# Grazie per l'attenzione!

## References

- Benassai, G., Campanile, A., Piscopo, V., Scamardella, A., 2014. Mooring control of semi-submersible structures for wind turbines. *Procedia Engineering* 70, 132-141.
- Benassai, G., Campanile, A., Piscopo, V., Scamardella, A., 2014. Ultimate and accidental limit state design for mooring systems of floating offshore wind turbines. *Ocean Engineering* 92, 64-74.
- Benassai, G., Campanile, A., Piscopo, V., Scamardella, A., 2015. Optimization of Mooring Systems for Floating Offshore Wind Turbines. *Coastal Engineering Journal* 57(4), 1550021,1-19.

*Seminario «Energia dal Mare»  
29 giugno 2016  
Aula Magna dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*