

# IMPIANTI EOLICI OFFSHORE

Prof.F.G.Cesari, Ing.F.Taraborrelli

Università di Bologna - DIENCA-LIN, Via Dei Colli n.16 – Bologna

## SOMMARIO

L'energia eolica, comincia ad essere competitiva con le tipiche fonti energetiche da combustibile ed altre fonti energetiche rinnovabili; negli anni abbiamo sviluppato attività di ricerca, ed applicazioni progettuali di impianti eolici, sia on-shore (sulla terraferma) in un primo tempo, ed offshore (in mare) successivamente, passando per applicazioni semi-offshore, cioè in zone costiere o vicine al mare.

Le applicazioni offshore, di cui oggi si vedono i primi impianti estensivi installati in mare, soprattutto nei paesi del nord come la Danimarca, sono per alcuni aspetti ancora nella fase di ricerca e sperimentale, soprattutto per le applicazioni rivolte ai fondali profondi (fino a 50 m), mentre le wind-farm on-shore, hanno raggiunto un buon grado di maturità, pur essendo ancora in pieno sviluppo, sia per numero di impianti che per potenze installate singolarmente.

Dai primi impianti eolici offshore, di qualche MW di potenza installata, si è passati ad impianti da 160 MW, con turbine eoliche da 2 MW ciascuna, mentre sono allo studio turbine fino a 5 MW; tra gli aspetti salienti da considerare, quando si parla di applicazioni offshore, c'è la presenza del mare, che differenzia sostanzialmente gli impianti offshore da quelli sulla terraferma, per struttura, risorsa energetica, trasporto installazione e montaggio, ambiente.

## 1. L'ENERGIA EOLICA IN ITALIA

Lo sviluppo dell'energia eolica nel nostro paese, pur se in ritardo rispetto a paesi come la Danimarca, la Germania, la Spagna, ha portato a fine 2003 ad avere una potenza installata in Italia di 904 MW [1].

Un grosso impulso all'installazione di centrali eoliche si è avuto con l'introduzione del CIP 6/92, uno strumento incentivante delle tariffe pagate al produttore di energia elettrica da fonte eolica; negli ultimi anni si è assistito ad un rallentamento dei tassi di crescita relativi alle installazioni di aerogeneratori, per un sistema legislativo, normativo e di mercato in fase di evoluzione.

La distribuzione di potenza eolica installata in Italia, vede la netta prevalenza delle regioni meridionali ed insulari, in particolare la Campania e la Puglia; è importante ricordare come le migliori condizioni di risorsa eolica disponibile, siano proprio nelle isole e nell'Italia del sud.

Si tratta esclusivamente di impianti on-shore, cioè di impianti ubicati sulla terraferma, frequentemente in zone montuose, con una potenza media installata di circa 600 kW/aerogeneratore, con aerogeneratori per la grande maggioranza di costruzione IWT-Vestas, seguiti dalla Enercon ed altri, tra i quali Gamesa, Bonus, RWT, NEG Micon e Fuhrlander.

Altri soggetti sono invece coinvolti nella produzione di energia, è il caso di IVPC, IVPC 4, Edens, Enel Green power, ed altri, con la partecipazione anche di consorzi ed enti; a fine 2003, l'energia prodotta da impianti eolici per l'Italia era di 1458,4 GWh lordi, con un incremento di 54,4 GWh rispetto all'anno precedente, per un contributo sulla produzione nazionale di poco inferiore allo 0,50 % di tutta l'energia lorda prodotta, compresi gli autoproduttori.

Con l'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto, gli impegni presi dai paesi partecipanti, Italia compresa, diventano

giuridicamente vincolanti, con l'obiettivo per l'Italia di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> di alcune decine di milioni di tonnellate/anno, con un rilevante aiuto che potrà essere dato dalla fonte eolica; ad oggi comunque, un'espansione della potenza installata potrà avvenire non solo intensificando lo sfruttamento dei siti on-shore, ma anche iniziando a realizzare impianti eolici off-shore.

## 2. IMPIANTI EOLICI OFF-SHORE NEL MONDO

Alla fine dell'anno 2003, in Italia non era stato installato nessun impianto off-shore, a differenza di quanto avvenuto in altri paesi europei, nei quali si sono realizzate vere e proprie centrali eoliche in mare o anche solo impianti sperimentali costituiti da uno o due aerogeneratori.

Il primo impianto ad essere costruito in mare, è stato quello di Vindeby (Dk), ubicato nel mar Baltico, e realizzato nel 1991; l'impianto si trova ad una distanza di 1,5-3 km dalla costa dell'isola di Lolland, vicino al villaggio di Vindeby [2].

La consistenza è di 11 aerogeneratori da 450 kw cadauno, per un totale di quasi 5 MW di potenza installata, con una producibilità di energia elettrica annua di circa il 20% superiore di quella ottenibile da simili impianti on-shore; si è provveduto anche all'installazione di due anemometri per studiare le condizioni del vento ed in particolare la turbolenza.

Qualche anno dopo, nel 1995, è stato costruito l'impianto di Tuno-Knob (Dk), nel mare di Kattegat, 3 km offshore dall'isola di Tuno, e 6 km offshore dalla penisola dello Jutland, per una consistenza di 10 aerogeneratori da 500 kw, per una potenza complessiva di 5 MW.

A questi primi impianti, di tipo semi-sperimentale, sono seguiti impianti eolici di taglia ben maggiore: Middlegrunden da 40 MW, con 20 aerogeneratori da 2 MW ciascuno, Samsø con 23 MW installati con 10 turbine eoliche da 2,3 MW,

Horns Rev con 160 MW installati mediante 80 turbine da 2 MW ciascuna [3], e Nysted con 165,3 MW installati, costituiti da 72 aerogeneratori da 2,3 MW.

Il salto dimensionale in termini di potenza, è di 4 volte da Vindeby a Middlegrunden, e di altre 4 volte circa da Middlegrunden a Nysted, arrivando a potenze installate in una sola centrale eolica, paragonabili a quelle esistenti alimentate da combustibili tradizionali.

La centrale eolica di Nysted, realizzata nel 2003, è ubicata 10 km a sud della città di Nysted (isola di Lolland), con aerogeneratori alti 70 m e rotori di oltre 82 m di diametro; la potenza totale installata è di 165,5 MW, costituiti da 72 aerogeneratori da 2,3 MW.

Senza dubbio la Danimarca è il paese con maggiore potenza offshore installata nel mondo, ma esistono comunque altri impianti, Bockstingen (Svezia) per 2,75 MW, Utgrunden (Svezia) 10,5 MW, Yttrestengrund (Svezia) 10 MW, Northhoyle (UK) per 60 MW di potenza installata, Arklow Bank (Irlanda) per 25,2 MW di potenza installata, ed altri.

### 3. ASPETTI SALIENTI DELLA TECNOLOGIA OFFSHORE

Le installazioni offshore, ad oggi, sono realizzate con aerogeneratori di elevata potenza unitaria, che permettono di meglio sfruttare la migliore risorsa eolica offerta dall'ambiente offshore.

Nell'impianto di Arklow Bank, in Irlanda, sono in uso macchine eoliche della GE, di 3,6 MW cadauna, che sono ad oggi le macchine a più elevata potenza unitaria installate nel mondo; comunque, negli impianti di ultima generazione, si va da 1,5 MW a 2,3 MW per aerogeneratore, nella stragrande maggioranza dei casi.

Tali aerogeneratori, hanno altezza di torre fino a 70-80 m (al rotore), e diametri di rotore di 70-80 m, con un massimo di 104 m per la macchina di 3,6 MW; le wind farms, sono poi realizzate in modo da evitare gli effetti di interferenza aerodinamica tra gli aerogeneratori, disponendoli a distanze reciproche di almeno 2-3 diametri di rotore.

La collocazione degli impianti in mare ha il vantaggio di offrire una migliore risorsa eolica e quindi una migliore producibilità energetica, una minore turbolenza del vento e quindi di una maggiore durabilità delle parti meccaniche, ed una migliore reperibilità di siti, essendo i siti on-shore soggetti a saturazione, anche per la non facile accettazione da parte delle popolazioni coinvolte nelle aree di installazione.

D'altro canto, esiste una diversa situazione di carichi statici e dinamici sulla fondazione e sull'aerogeneratore, sia per la presenza del mare che di una maggiore risorsa eolica, nonché per la presenza del ghiaccio nei mari del nord, esiste una più accentuata corrosività dovuta all'ambiente marino, una maggiore frequenza di fulminazione, una maggiore distanza dalla terraferma che implica l'adozione di infrastrutture elettriche rilevanti, possibili vincoli legati all'uso delle acque.

L'installazione a mare, implica delle procedure di trasporto, montaggio ed installazione/messa in opera, molto diverse da quelle sulla terraferma; è inevitabile che tempi ed attrezzature siano di altri ordini di grandezza, e soprattutto dal punto di vista strutturale assume grande rilevanza la struttura di fondazione.

#### 3.1 La Struttura di Fondazione

Le fondazioni usate ad oggi per aerogeneratori offshore in

fondali medio-bassi, cioè fino a 10-15 m metri di profondità, sono state inizialmente del tipo a cassone in cemento armato, per poi passare a strutture monopila ed eventualmente pluripila a traliccio o senza.

Le caratteristiche di una adeguata struttura di fondazione, devono essere [4]:

- costo di realizzazione compatibile con l'economicità dell'impianto, considerando che l'incidenza del costo di fondazione negli impianti a mare sale notevolmente;
- facilità di costruzione, trasporto a mare ed installazione;
- possibilità di produzione in serie;
- adattabilità ai diversi fondali, ed alle condizioni locali;
- progettazione finalizzata a rendere unico il blocco fondazione-aerogeneratore, dal punto di vista del comportamento statico-dinamico;
- facilità di montaggio con l'aerogeneratore, in situ o precedentemente al varo in mare;
- facilità di dismissione a fine vita dell'impianto.

Nella progettazione della fondazione, si devono considerare contemporaneamente i regimi idrodinamici (onde del mare, correnti, maree), i regimi aerodinamici, ed eventualmente quelli sismici; considerazione a parte sarà fatta per il rischio di impatto da natanti [5].

Fondamentale è la scelta del grado di rigidità trasferibile alla fondazione nei confronti di quello dell'aerogeneratore: una rigidità troppo elevata, può indurre vincoli al comportamento dell'aerogeneratore, mentre un assetto troppo elastico potrebbe abbassare la frequenza naturale del complesso a valori non corretti per la stabilità.

In genere le costruzioni a mare, vengono divise in due gruppi principali, in relazione alla frequenza fondamentale della struttura: strutture con frequenza propria maggiore dell'onda dominante e strutture con frequenza propria minore dell'onda dominante (ad esempio le strutture a traliccio hanno un periodo proprio di 3-5 secondi).

Si elencheranno di seguito alcuni aspetti indispensabili da esaminare nel dimensionamento di una struttura di fondazione:

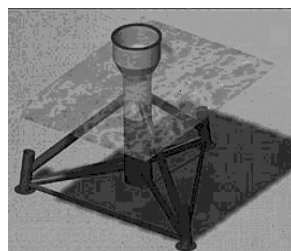
- a. Caratteristiche del terreno di fondazione: composizione stratigrafica, capacità portante degli strati interessati dalla fondazione, acclività del fondale marino, profondità.
- b. Ambiente marino: velocità/direzioni del vento ed altezza delle rilevazioni effettuate, altezza dell'onda al largo, altezza dell'onda sul sito, periodo di picco.
- c. Effetti prodotti dalla macchina eolica: momento flettente, taglio e forza verticale.
- d. Criteri di calcolo: riguardano le condizioni di carico e relativi coefficienti di sicurezza.
  1. Forze ambientali + peso proprio
  2. Forze di esercizio + peso proprio
  3. La più gravosa fra le condizioni suddette + forze ambientali
- e. Materiale strutturale
- f. Protezione superficiale della struttura: gli effetti da contrastare possono essere lo scouring (rimozione del terreno o di altro materiale di accumulo dalle aree di contatto con la fondazione), e la corrosione soprattutto delle parti metalliche [6].
- g. Fenomeni di fatica

Diamo ora un'approssimata quantificazione relativamente ai tipi di fondazione scelte fin ad un paio di anni fa per gli aerogeneratori offshore, distinguendo la fondazione a monopila da quella a gravità, e distinguendo le profondità di installazione, sotto o sopra i 10 m, in tabella 1.

**Tabella 1: tipi di fondazione**

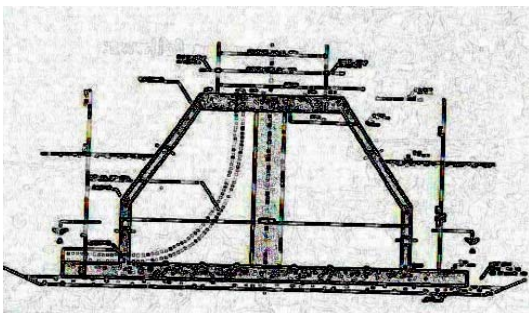
	>10 m	< 10 m
Monopila	90 unità	19 unità
Gravità	0 unità	145 unità

Negli ultimi due anni, la tendenza verso la scelta di fondazione monopila si è nettamente accentuata, mentre si pensa anche ad un uso di fondazioni a tripode (struttura a tre gambe) [7]; in Fig.1, Fig.2 e Fig.3 si possono vedere esempi dei tre tipi.



**Fig.1: Fondazione monopila**

**Fig.2 : Fondazione tripode**



**Fig.3 : Fondazione a gravità**

### 3.2 Impatto Economico ed Ambientale

Qualche considerazione merita l'aspetto economico, infatti ad oggi sembra verosimile ritenere che il costo di costruzione di un impianto eolico offshore, sia compreso tra i 1.450 ed i 1.650 kEuro/MW, valore che potrà poi variare in funzione di numerosi parametri. Si può vedere di seguito in tabella 2, ad esempio, il costo di alcuni impianti offshore realizzati fino ad oggi.

Le voci principali di costo sono costituite dalla macchina eolica e dalla struttura fondaria, seguite dalle opere elettriche, di trasporto e montaggio, e poi progettazione, indagini in situ, cantieristica.

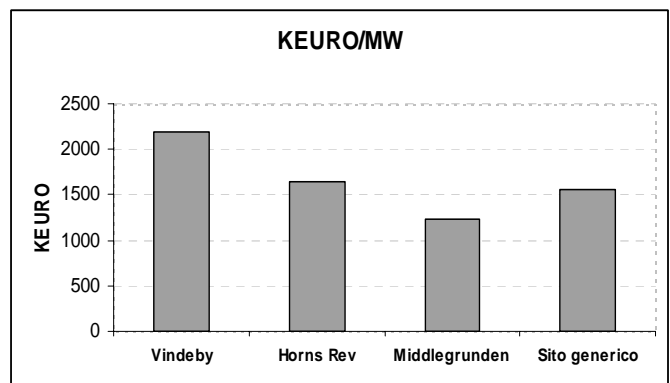
Per quello che riguarda l'impatto ambientale, si può senz'altro affermare che un impianto eolico offshore è meno impattante di un'impianto onshore; si possono considerare i seguenti aspetti:

- Aree di rispetto: si eviterà la localizzazione in aree soggette a vincoli ambientali, in aree che interferiscono con rotte navali/aeree, in zone militari, in zone a rischio

sismico, e in zone in cui esistono limitazioni all'uso dello specchio di mare prescelto.

- Rumore: gli aerogeneratori hanno emissioni sonore certificate entro certi limiti, comunque sono in genere poste ad una distanza tale dai centri abitati da non provocare disturbi.
- Impatto sull'ambiente non vivente: non si rilevano impatti rilevanti, se non possibili effetti inquinanti sull'acqua del mare nella fase di trasporto ed installazione per l'uso di mezzi navali (effetti comunque limitatissimi) e quelli dovuti alla messa in opera della fondazione e dei cavi sottomarini
- Impatto sull'ambiente vivente: l'ambiente vivente non subisce effetti rilevanti, considerando che il disturbo creato dalle operazioni a mare, soprattutto lo scavo per la fondazione e il sotterramento dei cavi sottomarini, hanno durata limitata nel tempo, riscontrando anzi successivamente all'installazione, un arricchimento in termini di biodiversità.
- Impatto visivo: la localizzazione in mare, permette di evitare la vicinanza con i centri abitati, ma non sempre si è riscontrato il favore della popolazione, perché gli aerogeneratori in mare sono visibili, pur potendo diminuire la visibilità aumentando la distanza dalla costa, e con la scelta di colori mimetizzabili con l'ambiente.

**Tabella 2: costo del MW installato**



E' opportuno ricordare, che la produzione di energia elettrica o in altra forma da fonte eolica, permette di evitare emissioni atmosferiche e di altro genere (rifiuti, scarichi in acqua, altro), con evidenti benefici ambientali e sociali; la quantificazione di tali benefici dipenderà poi dal mix energetico del paese di appartenenza.

### 3.3 Sistemi innovativi per l'installazione di macchine eoliche offshore

In questi ultimi anni, si cominciato a pensare al concetto di aerogeneratori installati a mare con l'utilizzo di piattaforme offshore già esistenti, oppure con sistemi galleggianti e semi-sommersi variamente collegati al fondale marino o alla costa.

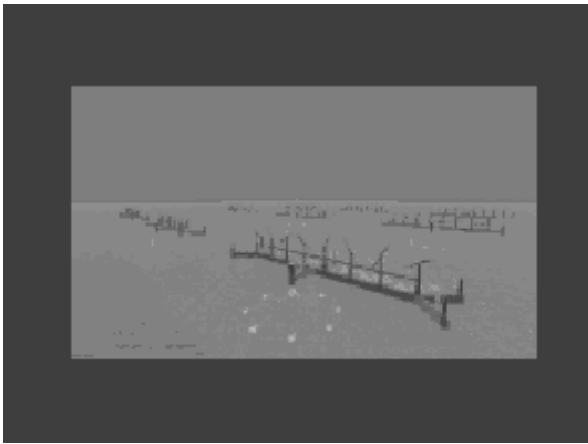
Un esempio proposto dalla Edison, di riutilizzo di una piattaforma offshore riguarda il VEGA, ubicata in un fondale profondo 120 m, a 22 km dalla costa siciliana; essa è costituita da un jacket a 8 gambe di acciaio, con dimensioni geometriche 80X60 m. Lo studio di pre-fattibilità ha considerato l'installazione di un aerogeneratore di 4,5 MW di potenza, dotato di un rotore di 112 m di diametro, per una producibilità annua di 12,2 GWh, con una velocità del vento a 50 m di 7,22 m/s.

Lo studio di strutture floating, per lo sfruttamento dell'energia eolica, nasce da diversi bisogni, legati alla necessità di evitare fondazioni fisse migliorando così l'impatto ambientale dell'impianto, e di poter eventualmente spostare l'insieme aerogeneratore-floating, da un sito all'altro [8].

Il sistema galleggiante è composto di due parti essenziali: la piattaforma galleggiante con il suo apparato di ancoraggio, e la turbina eolica rigidamente fissata alla piattaforma, in Fig.4.

Ad oggi sono state proposte varie soluzioni per applicazioni di questo genere, ma nessuna si è dimostrata economicamente competitiva con gli impianti offshore a fondazione, né è stata mai realizzata in condizioni operative; si possono considerare alcuni tipi di ancoraggio al fondale marino o alla costa, mediante cavi ancorati ad una o più masse fissate al fondale, o con collegamento rigido (tipo monopila) [9].

Le esperienze di laboratorio, hanno permesso di ottenere risultati su strutture floating e semi-sommerse, cioè i supporti, e su strutture di supporto con l'aerogeneratore ivi fissato, individuando le principali forze agenti sulla struttura e gli effetti ad esse relativi.



**Fig.4: strutture floating multi-generatore**

Tra gli studi condotti sull'argomento, si possono ricordare alcune soluzioni: i pontoni semi-sommersi per applicazioni di tipo estensivo, proposti dall'Università di Delft, oppure strutture di sostegno tubolari o in calcestruzzo ancorate al fondo del mare con cavi e pilastri [10] [11].

Lo studio ha riguardato la fattibilità di un progetto d'impianto a 50-200 km dalla costa, per una profondità di 50 m nel Mare del Nord, velocità media a 10 m di altezza di 9 m/s, ed installazione di una macchina da 5 MW per un parco eolico da 500 MW; il costo kwh stimato è di 0,068 Euro a 100 km, 0,074 Euro a 200 km, sono valori elevati se confrontati con i classici impianti offshore a fondazione, ma varrà la pena seguire l'evoluzione di questo tipo di sistemi floating.

#### **4. IMPIANTI EOLICI OFFSHORE PER FONDALI PROFONDI**

La ricerca di una migliore produttività degli impianti eolici, e di un minor impatto visivo, ha portato a spingere sulla ricerca di applicazioni d'altomare, con fondali dai 30 m ai 50 m, che vengono detti Fondali Profondi.

Il nostro gruppo di lavoro ha concentrato i propri sforzi nello studio di un sistema fondazione-aerogeneratore, con generatore eolico da 2 MW e fondazione di tipo "tripode", con

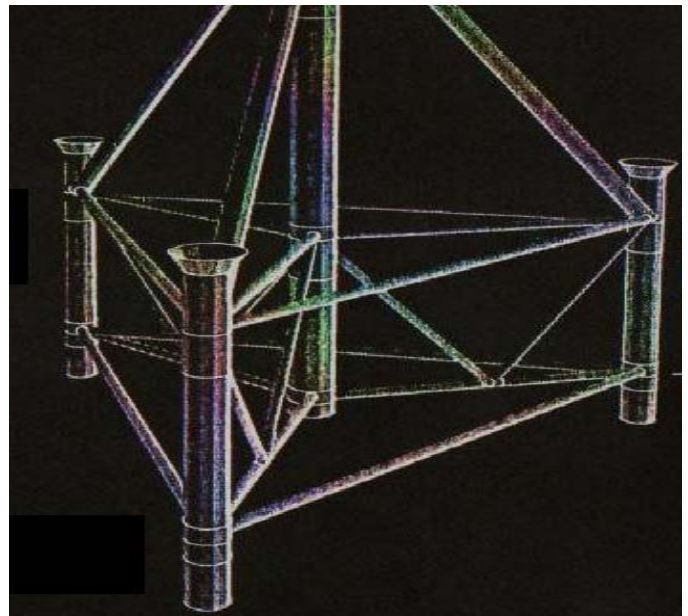
complesso formante una struttura stiff-stiff (relativamente alla rigidità).

Facendo largo uso di banche dati relative alle installazioni off-shore, si è presa in esame una fondazione tripode impiegata nell'industria petrolifera, ad operativa nel Mare Adriatico; l'indagine numerico-progettuale, si basa oltre che sui parametri già citati nel par.3.1, su altri parametri aggiuntivi in considerazione di un tipo di fondazione specifico (tripode vedi Fig.5) che richiede l'uso di pali di sostegno:

- a. L'effetto delle reazioni del suolo marino ai carichi trasmessi dai pali (si assume il terreno costituito da strati).
- b. La lunghezza d'inserimento del palo in funzione del suo diametro e del suo spessore (si terrà conto della forza d'urto del battipalo e la reazione di taglio del suolo).

Il tripode, come si può vedere in Fig. 5, rappresenta una struttura costituita da una colonna centrale, capace di trasferire i carichi a cui è soggetta, ai tre bracci (sleeves), posizionati al di sotto del livello del mare, attraverso i quali vengono guidati i pali di fondazione [12].

La colonna centrale è collegata ai tre bracci, attraverso una struttura reticolare, mentre il collegamento tra la struttura ed i pali di fondazione è ottenuta cementando l'annulus tra i pali e i bracci aperti alle estremità; sono montati anche tre bracci diagonali che collegano la colonna centrale ai tre sleeves.



**Fig.5 : Tripode per fondali profondi**

La struttura di cui sopra, è stata modificata, per aumentare la rigidità della struttura ed evitare spostamenti inaccettabili della sezione superiore della colonna centrale: si è agito su tre parametri fondamentali, il diametro e lo spessore della sezione, e la lunghezza libera d'inflessione della colonna centrale.

I diametri delle sezioni sono stati aumentati, e la lunghezza libera d'inflessione è stata diminuita di 8 m, portando il punto di contatto tra gli sleeves diagonali e la colonna centrale fuori dalla splash zone; non si è potuto comunque aumentare lo spessore delle sezioni oltre i 40 mm per difficoltà costruttive.

Tutti i carichi sono applicati alla radice della torre (a 5 m rispetto al livello del mare), con le seguenti ipotesi, per aerogeneratore da 2 MW e da 4 MW, rispettivamente in Tabella 3 e Tabella 4.

**Tabella 3**

Momento flettente	30.000 kN
Forza di taglio	500 kN
Forza verticale	2.000 kN

**Tabella 4**

Momento flettente	160.000 kN
Forza di taglio	2.000 kN
Forza verticale	5.000 kN

Ci interessa in particolare conoscere alla base della torre la freccia d'inflexione e la rotazione della sezione, per una struttura che è completamente in acciaio e la cui vita prevista è di 20 anni.

Mediante programma di calcolo, si è proceduto ad effettuare le seguenti analisi di progetto per la macchina da 2 MW:

- Analisi statica della struttura in servizio;
- Analisi dinamica e di fatica;
- Analisi dei pali di fondazione;
- Analisi di load out della colonna centrale;
- Analisi di trasporto della colonna centrale;
- Analisi di sollevamento della struttura e messa a mare;
- Stabilità on bottom della struttura e progettazione delle mud-mats (piedi di appoggio a terra).

Tali analisi verranno ripetute per la macchina da 4 MW, per verificarne la installabilità sulla stessa struttura o su struttura modificata.

## BIBLIOGRAFIA

1. L.Pirazzi e R.Vigotti, *Le vie del vento* Tecnica, economie e prospettive del mercato dell'energia eolica, Cap.2, Franco Muzzio Editore, 2004 Roma (I).
2. AA.VV., OWEMES 94 (Offshore wind energy in Mediterranean and other European seas), Atti del convegno, 1994 Roma (I).

4. L.Pirazzi e R.Vigotti, *Le vie del vento* Tecnica, economie e prospettive del mercato dell'energia eolica, Cap.11, Franco Muzzio Editore, 2004 Roma (I).

5. Cesari F., "Ricerche per aerogeneratore da collocare in sito fuori costa: criteri e problematiche strutturali in appoggio a studio tecnico-economico di fondazione" LIN 1510, Bologna (I), Novembre 1990.

6. M.B. Zaaijer, J van der Tempel, "Scour Protection: necessity or a waste of money ?", 43<sup>rd</sup> IEA Topical Expert Meeting – Critical Issues Regarding Offshore Technology and Deployment, pp.43-51, Skaerbaek (Dk), 2004.

7. "Comparison of monopole, tripod, suction bucket and gravity base design for a 6 MW turbine", AA.VV., OWEMES 03 (Offshore wind energy in Mediterranean and other European seas), Atti del convegno, pp.255-269, 2003 Napoli (I).

8. Cesari F., Gaudiosi G., Battistella P., Taraborrelli F., Carrara S., (1999) "Wind turbine on floating platforms for desalination plants", European Wind Energy Conference, pp.982, Nizza (F) 1999.

9. Bertacchi P., Di Monaco A., Gerloni M., Ferranti G., "Eolomar, a moored platform for wind turbines", OWEMES Conference (Offshore wind energy in Mediterranean and other European seas), 1994 Rome, II session.

10. Tong K.G., "Technical and economic aspects of a floating offshore wind farm", OWEMES Conference (Offshore wind energy in Mediterranean and other European seas), 1994 Rome, III session.

11. "Floating windfarms for shallow waters offshore sites", AA.VV., OWEMES 03 (Offshore wind energy in Mediterranean and other European seas), Atti del convegno, pp.433-446, 2003 Napoli (I).

12. North Adriatic Offshore, IDA C PLATFORM, "Design premises for monopod & deck structures", Ravenna (I), 2004.

3. "The Horns Rev Wind Farm project, Denmark, Status", AA.VV., OWEMES 03 (Offshore wind energy in Mediterranean and other European seas), Atti del convegno, pp.459-468, Napoli (I) 2003.

