

REGIONE BASILICATA

Provincia di Potenza

COMUNI DI FORENZA E MASCHITO

**PROGETTO**

**PARCO EOLICO FORENZA – MASCHITO  
POTENZIAMENTO IMPIANTO DI FORENZA**



**PROGETTO DEFINITIVO**

**COMMITTENTE**

*ERG Wind 4*



**PROGETTISTA**



**OGGETTO DELL'ELABORATO**

**A.7 – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti**

**ERG Wind 4 srl**  
*Società con unico socio ERG Wind Holdings (Italy) srl, soggetta all'attività di direzione e coordinamento di ERG spa*

[www.erg.eu](http://www.erg.eu)

Torre WTC Via De Marini 1  
16149 Genova Italia  
ph +39 010 24011  
fax +39 010 2401490

Sede Legale: Torre WTC Via De Marini 1 16149 Genova Italia Cap. Soc. euro 6.632.737,00 I.V. R.E.A. Genova 477792 Reg. Impr. GE Cod. Fisc. e P. IVA 02269650640

Rev.  
Data di emissione

00  
18/04/2019

## RAPPORTO

USO RISERVATO APPROVATO B9010786

**Cliente** ERG Power Generation S.p.A.

**Oggetto** Parco Eolico di Forenza (PZ) e Maschito (PZ)  
Potenziamento impianto di Forenza  
Progetto definitivo  
Rapporto A.7  
**Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti**

**Ordine** 4700026165 del 06/06/2018

**Note** Rev. 00  
WBS A1300001447X003  
Lettera di trasmissione prot. B9007982

Progettista civile: Ing Rita Pellegrini, dipendente CESI, incarico interno B9012498 del 20/06/2019

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

PAD B9010786 (2668737) - USO RISERVATO

**N. pagine** 12 **N. pagine fuori testo** 0

**Data** 18/04/2019

**Elaborato** SCE - Rebecchi Valter  
B9010786 115016 ALT

**Verificato** SCE - Pellegrini Rita, SCE - Nardi Andrea  
B9010786 115018 VER B9010786 3011309 VER

**Approvato** SCE - Carnevale Francesco (Project Manager)  
B9010786 3194063 APP



Mod. RAPP v. 10

**CESI S.p.A.**

Via Rubattino 54  
I-20134 Milano - Italy  
Tel: +39 02 21251  
Fax: +39 02 21255440  
e-mail: info@cesi.it  
www.cesi.it

Capitale sociale € 8.550.000 interamente versato  
C.F. e numero iscrizione Reg. Imprese di Milano 00793580150  
P.I. IT00793580150  
N. R.E.A. 429222

© Copyright 2019 by CESI. All rights reserved

Pag. 1/12

## *Indice*

1	PREMESSA.....	3
2	RIFERIMENTI.....	6
3	DATI E IPOTESI DI LAVORO .....	6
4	CALCOLO DELLA GITTATA .....	9
5	CONCLUSIONI.....	11

## STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
00	18/04/2019	B9010786	Prima emissione

## 1 PREMESSA

ERG Power Generation S.p.A. ha incaricato CESI di redigere il progetto definitivo relativo al potenziamento dell'esistente parco eolico, composto da n. 60 aerogeneratori Vestas V47, ciascuno di potenza nominale pari a 0,66 MW, per una potenza complessiva di 39,60 MW, ubicato nei Comuni di Forenza (36 aerogeneratori) e Maschito (24 aerogeneratori), in Provincia di Potenza (PZ) di proprietà della società ERG Wind 4 s.r.l. L'impianto esistente è attualmente in esercizio.

Il progetto di potenziamento consiste nella sostituzione dei 36 aerogeneratori ubicati nel Comune di Forenza, con 12 aerogeneratori di grande taglia (posizionati sempre nel Comune di Forenza), per una potenza massima installabile di 54 MW.

Gli aerogeneratori ubicati nel Comune di Maschito resteranno in esercizio nella attuale configurazione (24 aerogeneratori da 0,66 MW, per una potenza di 15,84 MW).

Dopo il potenziamento, l'intero impianto avrà quindi una potenza complessiva massima di 69,84 MW (54 MW di nuova installazione e 15,84 MW dell'impianto esistente).

Con riferimento all'estensione complessiva del parco, l'impianto oggetto di potenziamento può essere suddiviso in 2 aree geografiche:

- Area centro, comprendente 8 nuovi aerogeneratori in progetto (R-FZ01÷R-FZ08); l'aerogeneratore più vicino al centro abitato di Forenza si trova ad 1.5 km in direzione Sud Est.
- Area sud, comprendente 4 nuovi aerogeneratori in progetto (R-FZ09÷R-FZ12); l'aerogeneratore più vicino al centro abitato di Forenza si trova ad 1.6 km in direzione Nord Ovest.

Le attività illustrate nel presente rapporto tecnico riguardano la stima della distanza massima alla quale può essere proiettata la pala di un aerogeneratore nell'ipotesi estrema di distacco della pala alla radice durante il funzionamento alla massima velocità di rotazione (con vento alla velocità di *cut-out*).

Le rose dei venti per il sito eolico in oggetto, tratte dal Rif.[1], sono riportate nella Figura 2: le direzioni prevalenti sono Ovest-Sudovest e Nord-Nordovest.

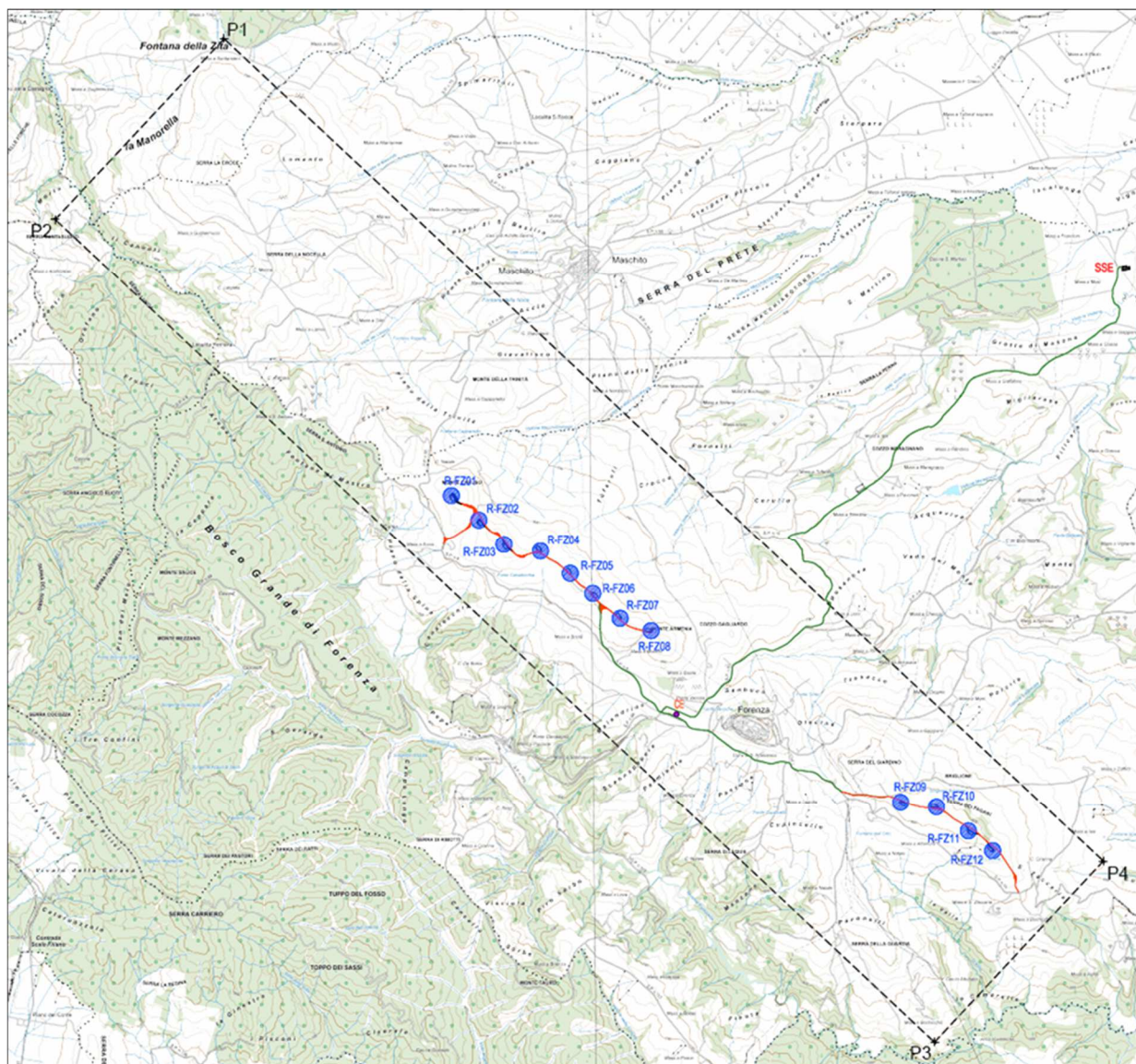
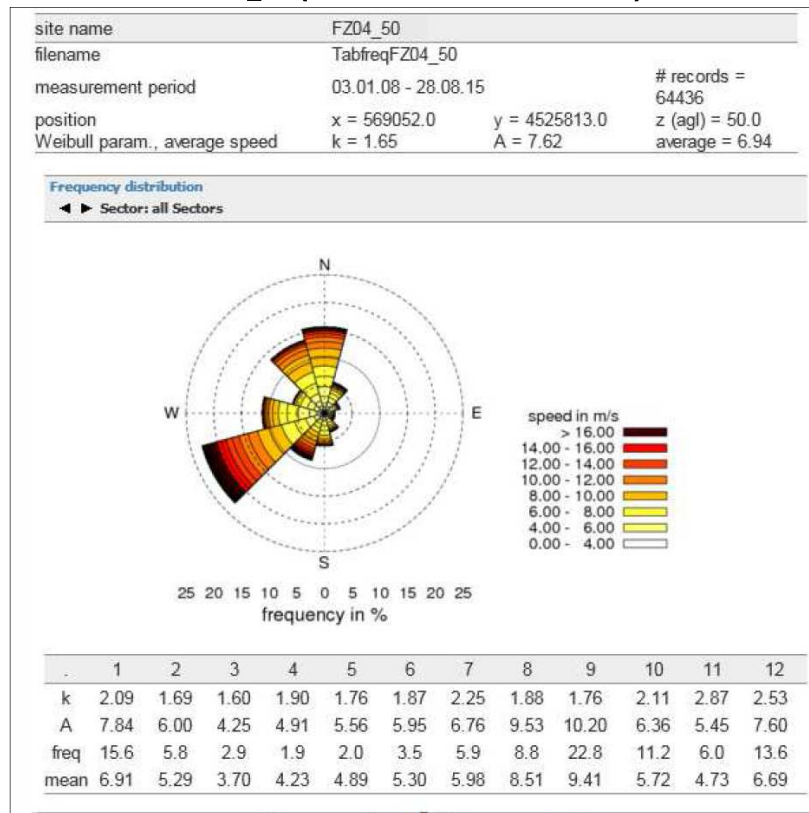


Figura 1: Layout generale dell'impianto (dal Rif.[2])

### FZ04\_50 (Forenza Maschito centrale)



### FZ01\_50 (Forenza meridionale)

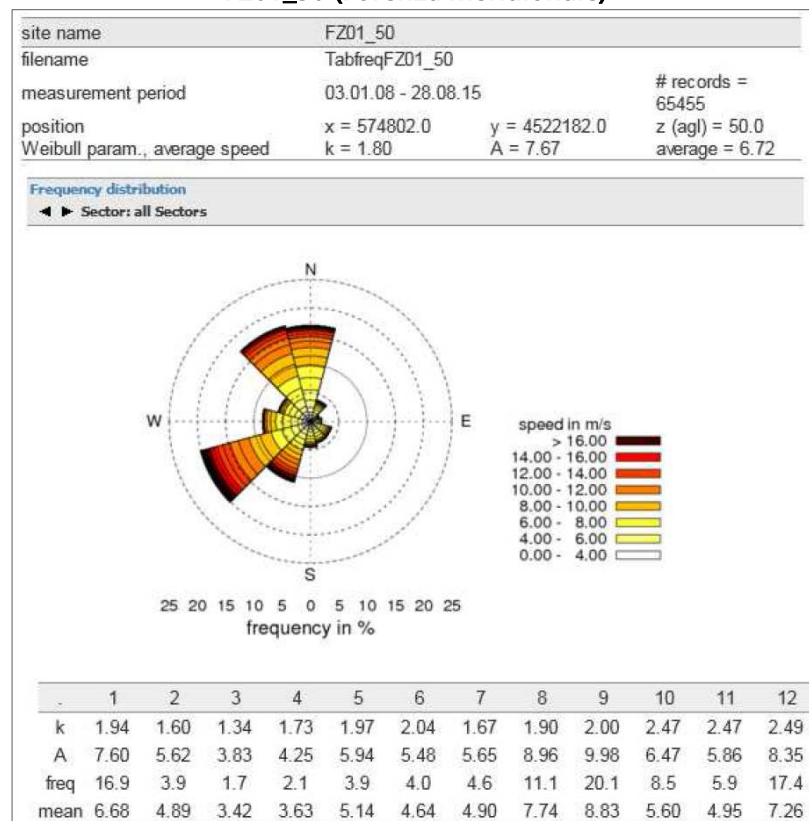


Figura 2: Tabelle di frequenze per le due stazioni anemometriche considerate (dal Rif.[1])

## 2 RIFERIMENTI

- [1] ERG: STUDIO ANEMOLOGICO – “Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità”. Doc. FOM-ENG-REL-0001-0 del 14/06/2019.
- [2] CESI: “Potenziamento parco eolico Forenza-Maschito – Progetto definitivo - Carta con localizzazione georeferenziata (Gauss-Boaga-Roma 40 E)”. Elaborato nr. A.16.a.5.
- [3] Siemens-Gamesa: “Preliminary Developer Package, SG 4.5-145” Document ID: GD372187 R0 2018.04.30
- [4] Vestas: “Early Customer Engagement Document V136-4.2 MW 50/60 Hz” Document no.: 0066-5416 V02 2017-06-22.
- [5] Nordex: “Technical description Wind turbine class K08 delta N131/3900 IEC S” E0003806613 Revision 03 / 2017-11-30
- [6] H.Sarlak, J.N.Sorensen: “Charactization of blade throw from a 2.3 MW horizontal axis wind turbine upon failure”. AIAA Scitech 5-9 January 2015 – 53rd AIAA Aerospace sciences Meeting.
- [7] C.J.Faasen, P.A.L. Franck, A.M.H.W. Taris: “Handboek Risicozonering Windturbines” by DNV GL rev 3.1 September 2014.
- [8] “Recommendations for risk assessment of ice throw and blade failure in Ontario” by Garrand Hassan Canada Inc. Doc 38079/OR/01 dated 31 May 2007.
- [9] ] “Wind energy production in cold climate (WECO) by Finnish Metereological Institute, doc. JOR3-CT95-0014, December 1998.

## 3 DATI E IPOTESI DI LAVORO

Si considera un aerogeneratore avente le seguenti caratteristiche, ricavate attraverso l’inviluppo della documentazione resa disponibile per le macchine tipo:

- *Nordex N131/3900*
- *Siemens-Gamesa 4.5-145*
- *VESTAS 136 4.2.*

### Rotore

Diametro	145 m
Velocità rotazionale massima	14.4 r.p.m.

### Pale

Lunghezza	71 m
Peso della pala	15700 kg

### Torre tubolare

Altezza mozzo	114 m
---------------	-------

Si considerano le seguenti ipotesi di lavoro:

- Pala rigida (la sua deformabilità non influisce sui calcoli balistici).
- Vento corrispondente al valore di cut-out, pari a 27 m/s.
- Si assume che il centro di gravità della singola pala sia posizionato lungo l’asse della pala a circa 1/3 del raggio (l<sub>cg</sub> nella Figura 3).

- Per la pala in movimento si considera come superficie resistente al moto quella ricavata da una schematizzazione triangolare della stessa:

$$S = \frac{1}{2} \text{corda}_{\text{max}} \times \text{lunghezza} = \frac{1}{2} 4 \times 71 = 142 \text{ m}^2$$

- Per la pala in movimento si considera che il moto rotatorio attorno al CG risulti a velocità angolare costante (si considera resistenza aerodinamica nulla per la componente rotazionale).
- Resistenza aerodinamica calcolata come:

$$R = \frac{1}{2} \rho S C_D V^2$$

Essendo:

$\rho$  = densità dell'aria, pari a  $1.225 \text{ kg/m}^3$

$C_D$  = coefficiente di resistenza medio

$V$  = velocità relativa aria-pala

$S$  = superficie normale della pala

- Velocità di rotazione pari a quella massima (14.4 giri/min)

Si considera quindi lo schema della Figura 3: l'asse longitudinale della pala, in rotazione antioraria con velocità  $\omega$ , all'istante del distacco è inclinato di un angolo  $\alpha$  rispetto all'orizzontale.

La velocità istantanea del centro di massa (CG) della pala è quindi inclinata di un angolo pari a  $(90^\circ - \alpha)$  sull'orizzontale e ha modulo pari a:

$$V_0 = \omega \times l_{CG} \quad [\text{m/s}]$$

mentre la quota sul terreno del CG della pala all'istante del distacco è:

$$h_{CG} = ht - L/3 \text{ sen} \alpha \quad [\text{m}]$$

All'istante del distacco la pala si trova quindi sottoposta alla velocità  $V_0$  nel suo CG, alla velocità  $\omega L$  all'estremità e ad una velocità prossima a zero nel punto di collegamento al mozzo.

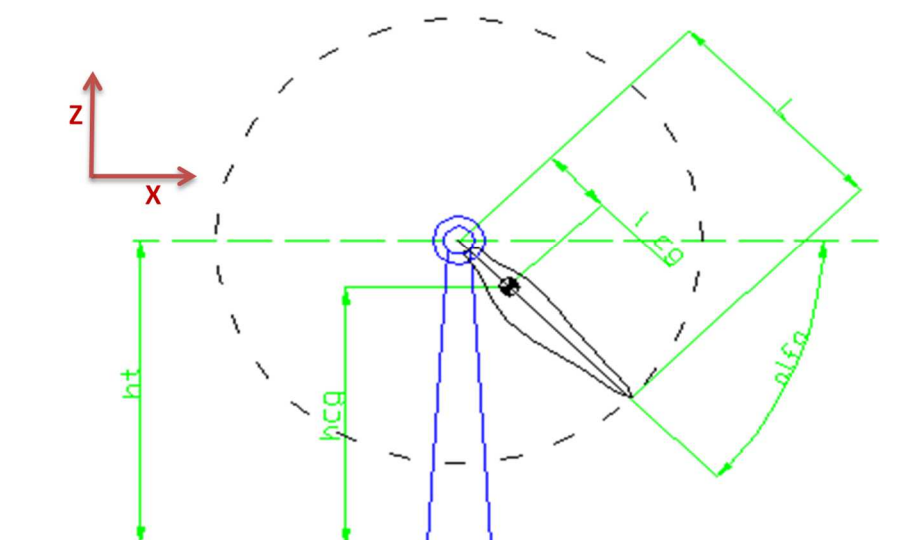


Figura 3: Schema generale



Durante il normale funzionamento dell'aerogeneratore i profili aerodinamici delle pale possiedono un *angolo di incidenza* rispetto al *vento relativo* che li investe (formato dalla composizione vettoriale del vento, in direzione Y, e della velocità nel piano XY dovuta alla rotazione) il quale permette ai profili aerodinamici di sviluppare una forza aerodinamica agente tangenzialmente nel piano XZ che quindi mantiene in movimento il generatore (l'entità di tale forza aerodinamica e il suo punto di applicazione variano al variare dell'angolo di incidenza).

Essendo tale *vento relativo* composto dal vento (agente in direzione Y) e dalla componente di velocità dovuta alla rotazione (che varia linearmente dal mozzo all'estremità della pala) la sua direzione varia anch'essa in modo molto marcato passando dalla radice all'estremità della pala. Per mantenere tutta l'ampiezza della pala entro un angolo di incidenza appropriato le pale sono caratterizzate da una notevole variazione dell'angolo di inclinazione del profilo lungo la pala (svergolamento).

Le pale sono collegate al mozzo con un meccanismo che permette loro di variarne il *passo* (ossia ruotare attorno all'asse della pala) in modo da adattarsi a un ampio range di velocità del vento.

Nel momento in cui, a seguito della rottura alla radice, la pala risulta libera, essa si trova sottoposta solo all'azione delle forze aerodinamiche agenti sui profili, non più bilanciate dalle azioni vincolari.

I profili aerodinamici risultano essere intrinsecamente instabili, ovvero generano azioni aerodinamiche (dipendenti dall'angolo di incidenza) che tendono ad aumentare l'angolo stesso; il moto della pala libera diverge quindi molto rapidamente da quello iniziale e i profili si trovano presto investiti dal vento relativo con angoli di incidenza superiori a quello di stallo, con conseguente generazione di turbolenza e rapido aumento della resistenza.

La stabile configurazione pala-vento relativo che si ha durante il normale funzionamento viene quindi rapidamente sconvolta e gli angoli di incidenza profili-vento relativo subiscono variazioni rapide e incontrollate.

In tali condizioni la pala non si comporta più come un elemento generatore di portanza ma risulta soggetta ad azioni aerodinamiche caotiche la cui risultante media può essere individuata come una forza opposta alla direzione del vento relativo (resistenza aerodinamica).

La dinamica caotica che ne consegue può essere quindi schematizzata realisticamente solo prescindendo dall'orientamento della pala attorno al suo asse longitudinale e facendo riferimento alle sole grandezze dinamiche relative al suo CG che tenderà a seguire una traiettoria balistica (parabolica) nel piano del rotore, mentre la pala inizierà un moto rotatorio attorno al suo CG. L'azione del vento, per effetto della resistenza aerodinamica, aggiungerà una componente in direzione Y al moto del CG.

Le forze aerodinamiche applicate alla pala libera possono quindi essere schematizzate con una resistenza aerodinamica avente un valore valutato sulla base della velocità della pala stessa e su un coefficiente di resistenza medio stimato.

Si assume che, data la notevole inerzia della pala, il suo asse longitudinale resti sostanzialmente nel piano XZ.; tale assunzione risulta conservativa ai fini della valutazione della girata massima.

La rosa dei venti (Figura 2) indica che i venti predominanti hanno direzioni Ovest-SudOvest e Nord-NordOvest.

La traiettoria di volo più probabile della pala sarà definita da un vettore avente una componente in direzione normale al vento (dovuta all'effetto centrifugo) e una componente nella direzione del vento (effetto di trascinamento della pala).

Per venti in direzione Ovest-Sudovest le traiettorie si svilupperanno quindi nelle direzioni Nord-NordOvest e Sud-SudEst, mentre per venti in direzione Nord-Nordovest le traiettorie si svilupperanno nelle direzioni Ovest-Sudovest e Est-NordEst.

## 4 CALCOLO DELLA GITTATA

Sulla base delle condizioni definite al capitolo precedente si calcola la traiettoria del CG della pala sottoposta alle seguenti forze:

- a) Peso proprio (154 kN agente in direzione -Z)
- b) Resistenza aerodinamica in direzione del vento relativo. Superficie S pari a 142 m<sup>2</sup>

La resistenza aerodinamica che agisce sulla pala dipende dalla velocità relativa vento-pala: tale componente non è costante ma diminuisce man mano che la pala viene accelerata dal vento in direzione Y.

Il calcolo della traiettoria è stato quindi sviluppato a partire dalle condizioni iniziali ( $V_0$  e  $\alpha$ ) considerando Peso proprio e Resistenza aerodinamica.

Nella Figura 4 sono riportate le traiettorie del CG della pala in termini di altezza (rispetto alla quota del terreno di fondazione) e distanza dalla torre (combinazione delle distanze in X e Y) al variare dell'angolo iniziale  $\alpha$  tra 20° e 70°.

Le traiettorie sono state calcolate considerando  $CD=1$  (valore ritenuto rappresentativo delle condizioni aerodinamiche medie effettive<sup>1</sup>).

La gittata corrisponde alla distanza letta in corrispondenza del valore Z corrispondente al dislivello tra la quota del "bersaglio" e quella della base dell'aerogeneratore: per bersagli alla stessa quota della fondazione la gittata viene quindi letta in corrispondenza di  $Z=0$ .

Dai grafici in Figura 4 si evidenzia che la gittata massima del CG della pala si determina in corrispondenza di  $\alpha=60^\circ$ . Tale gittata massima vale:

- 163 m per un dislivello nullo rispetto alla piazzola
- 178 m per un dislivello di 50 m rispetto alla piazzola
- 198 m per un dislivello di 100 m rispetto alla piazzola

Tali gittate sono ovviamente legate all'assunzione del coefficiente di resistenza  $CD=1.0$ , ma anche considerando il caso estremo con resistenza aerodinamica nulla gli incrementi restano limitati a valori attorno al 35%.

Il dato riportato nella Figura 4 riguarda solo il CG della pala e non tiene conto delle diverse possibili modalità di contatto pala-terreno: contatto con il terreno alla radice della pala o all'estremità della pala. Al momento del distacco la pala possiede una

<sup>1</sup> Il CD di una lastra piana indefinita investita da un flusso ortogonale alla superficie è pari a 2, mentre quando è investita da un flusso parallelo alla superficie il CD si attesta su valori estremamente ridotti ( $\approx 0$ ). Il valore medio può essere quindi assunto pari a 1.0.

velocità angolare pari a 1.51 rad/s (86.5 gradi/sec): ammettendo che tale velocità si conservi, all'istante di contatto con il terreno l'angolo di inclinazione della pala sarà:  
 $\alpha' = \alpha - \omega t = 60 - 86.5 t$  (considerando il caso  $\alpha = 60^\circ$ ).

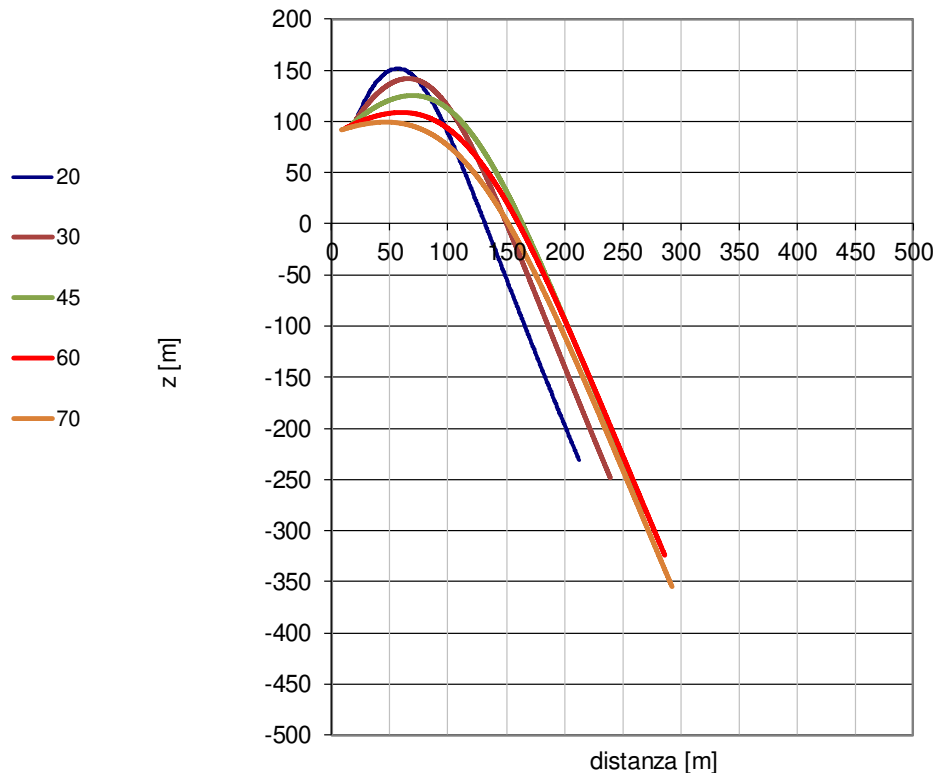


Figura 4: Traiettorie del CG della pala

Nella Figura 5 sono riportate (per il caso con  $CD=1$  e  $\alpha = 60^\circ$ ) l'evoluzione temporale delle quote di CG, radice (root) e estremità (tip) della pala:

- Per  $Z = 0$  (terreno pianeggiante) la root impatta per prima il terreno dopo circa 6.5 sec dal distacco ad una distanza di 170 m. La root potrà quindi estendere la gittata sino a circa  $170+71=241$  m.
- Per  $Z = -50$  (50 m di dislivello) la tip impatta per prima il terreno dopo circa 7.4 sec dal distacco ad una distanza di 132 m. La root potrà quindi estendere la gittata sino a circa  $132+71=203$  m.
- Per  $Z = -100$  (100 m di dislivello) la root impatta per prima il terreno dopo circa 9.3 sec dal distacco ad una distanza di 180 m. La tip potrà quindi estendere la gittata sino a circa  $180+71=251$  m

Si nota che la gittata della pala così valutata non aumenta in modo regolare con l'aumentare del dislivello: tale apparente contraddizione è dovuta al fatto che il CG non è posizionato nella mezzeria della pala, ma risulta molto più prossimo alla root. Quando il primo contatto con il terreno avviene con la tip, il CG si trova ancora relativamente alto sul terreno e la traiettoria di volo viene quindi interrotta prima rispetto al caso di contatto con la root.

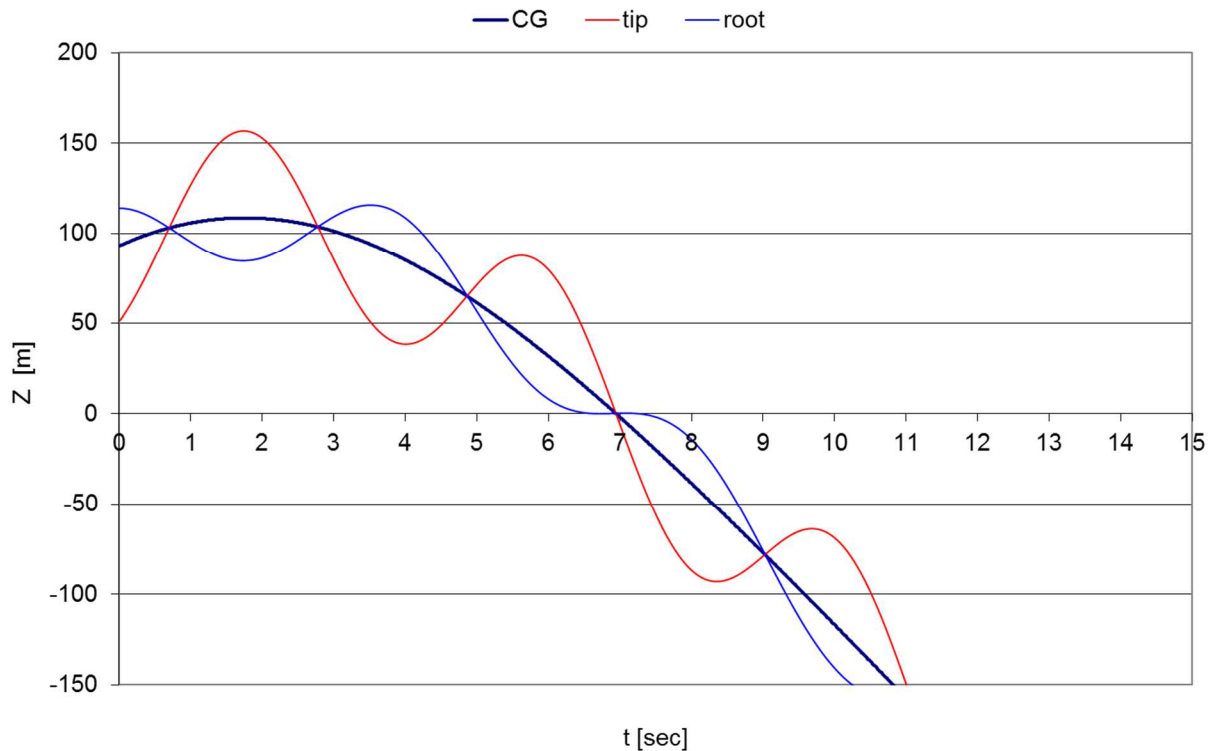


Figura 5: Evoluzione temporale delle quote di CG, tip e root della pala (CD=1)

## 5 CONCLUSIONI

L'analisi presentata nel presente rapporto, emesso come elaborato attinente al progetto definitivo delle opere civili per l'impianto eolico di Forenza, riguarda la valutazione della gittata massima raggiungibile da una pala di generatore eolico nei casi limite di distacco improvviso di una pala alla radice durante il funzionamento alla massima velocità di rotazione e vento pari al valore di cut-out.

I risultati dei calcoli indicano che la gittata massima della pala risulta pari a 250 m se la quota del bersaglio risulta 100 m inferiore a quella della piazzola dell'aerogeneratore.

A partire da questi risultati può essere svolta una valutazione della potenzialità di impatto sull'ambiente circostante, per ognuno dei 12 aerogeneratori, le cui posizioni e quote sono riportate nella Figura 6.

Per le considerazioni già espresse al Cap.3, le massime gittate sono attese nelle direzioni Nord-NordOvest/Sud-SudEst (venti in direzione Ovest-Sudovest) e Ovest-Sudovest/Est-NordEst (venti in direzione Nord-Nordovest).

Nota posizione e quota di un "bersaglio" è infatti immediato il calcolo di distanza e dislivello dai diversi aerogeneratori.

Sigla	Coordinate UTM WGS84 F33		Quota (m)
	Est	Nord	
WTG	E	N	
R-FZ01	568497	4526270	866.9
R-FZ02	568822	4525979	852.0
R-FZ03	569118	4525690	874.9
R-FZ04	569551	4525611	853.8
R-FZ05	569902	4525346	840.0
R-FZ06	570169	4525108	826.4
R-FZ07	570492	4524813	826.2
R-FZ08	570859	4524668	827.8
R-FZ09	573808	4522636	809.0
R-FZ10	574231	4522589	824.0
R-FZ11	574609	4522295	815.1
R-FZ12	574896	4522062	795.4

Figura 6: Posizioni e quote degli aerogeneratori (dal Rif.[1])

La macchina più vicina al comune di Forenza (R-FZ08) appartiene all'area Centrale e si trova ad 1.5 km in direzione Sud Est.

Il Comune risulta quindi nettamente esterno alle gittate massime calcolate, anche considerando le ipotesi più sfavorevoli.