

REGIONE MOLISE

Provincia di Campobasso

COMUNI DI MACCHIA VALFORTORE – MONACILIONI - PIETRACATELLA

**PROGETTO**

POTENZIAMENTO PARCO EOLICO DI MACCHIA VALFORTORE – MONACILIONI – PIETRACATELLA – S. ELIA A PIANISI



PROGETTO DEFINITIVO

**COMMITTENTE**

*ERG Wind 4*



**PROGETTISTA**

**CESI** ALSMES  
IPN  
ECON  
ESTRUCOL  
ESTRUCOL CESI-S.p.A. ¶  
Via Rubathino 54 ¶  
I-20134 Milano – Italy ¶

**OGGETTO DELL'ELABORATO**

815.R.009 – Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti



**ERG Wind 4 srl**

Società con sede in: Via De Marini 1, 16149 Genova, Italia. È un soggetto all'interno di direzione e coordinamento di ERG spa

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

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 6.632.732,00 I.V. R.E.A. Genova 477792 Reg. Impr. GE Cod. Fisc. e P.IVA 02269650640

Rev.

00

Data di emissione

15/12/2018

<b>Cliente</b>	ERG Power Generation S.p.A.
<b>Oggetto</b>	Potenziamento Parco Eolico di Macchia Valfortore – Monacilioni – Pietracatella – S. Elia a Pianisi Progetto definitivo Rapporto 815.R.009 Relazione specialistica – Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti
<b>Ordine</b>	4700026165 del 06/06/2018 e 4700026592 del 05/10/2018
<b>Note</b>	Rev. 00 WBS A1300001447X002 e A1300000815X002 Lettera di trasmissione prot. B8024995  Progettista civile: Ing Rita Pellegrini, dipendente CESI, incarichi interni B8019000 del 21/09/2018 e B8024162 del 27/11/2018

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



<b>N. pagine</b>	14	<b>N. pagine fuori testo</b>	0
<b>Data</b>	15/12/2018		
<b>Elaborato</b>	Valter Rebecchi		
<b>Verificato</b>	Andrea Nardi		
<b>Approvato</b>	Fabrizio Gatti		

## *Indice*

1	PREMESSA.....	3
2	RIFERIMENTI.....	7
3	DATI E IPOTESI DI LAVORO .....	8
4	CALCOLO DELLA GITTATA DELLA PALA.....	11
5	CONCLUSIONI.....	13

## STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Protocollo	Data	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
00	B8024042	15/12/2018	Prima emissione

## 1 PREMESSA

ERG Power Generation S.p.A. ha incaricato CESI di redigere il progetto definitivo relativo al potenziamento di 2 parchi eolici adiacenti tuttora in esercizio, di potenza complessiva pari a 37,26 MW, costituiti da n. 53 aerogeneratori ubicati nei territori Comunali di Monacilioni, Pietracatella, Sant'Elia a Pianisi e Macchia Valfortore, in Provincia di Campobasso; così suddivisi:

- impianto di Monacilioni – Pietracatella – Sant'Elia; costituito da n. 41 aerogeneratori di potenza unitaria 0,66 MW, così distribuiti: n. 23 aerogeneratori in Comune di Monacilioni, n. 15 aerogeneratori in Comune di Pietracatella, n. 3 aerogeneratori in Comune di Sant'Elia a Pianisi;
- impianto di Macchia Valfortore costituito da n. 12 aerogeneratori di potenza unitaria 0,85 MW ubicati in Comune di Macchia Valfortore.

Il progetto di potenziamento consiste nella totale sostituzione degli aerogeneratori presenti nei due impianti, con 16 aerogeneratori di grande taglia, per una potenza massima installabile di 72 MW; così suddivisi:

- n. 5 aerogeneratori di potenza compresa tra 3,6 e 4,5 MW in Comune di Monacilioni;
- n. 5 aerogeneratori di potenza compresa tra 3,6 e 4,5 MW in Comune di Pietracatella;
- n. 6 aerogeneratori di potenza compresa tra 3,6 e 4,5 MW in Comune di Macchia Valfortore.

Gli aerogeneratori in progetto sono diversamente indicati con il codice R-MN, R-PC o R-MC a seconda che ricadano rispettivamente nei Comuni di Monacilioni, Pietracatella o Macchia Valfortore.

In particolare:

- nel Comune di Monacilioni saranno installati 5 nuovi aerogeneratori, aventi le seguenti sigle: R-MN01, R-MN02, R-MN03, R-MN04, R-MN05;
- nel Comune di Pietracatella saranno installati 5 nuovi aerogeneratori, aventi le seguenti sigle: R-PC01, R-PC02, R-PC03, R-PC04, R-PC05;
- nel Comune di Macchia Valfortore saranno installati 6 nuovi aerogeneratori, aventi le seguenti sigle: R-MC01, R-MC02, R-MC03, R-MC04, R-MC05, R-MC06.

Gli aerogeneratori ubicati nei Comuni di Monacilioni e Pietracatella faranno parte della stessa unità produttiva, quelli ubicati nel Comune di Macchia Valfortore, costituiranno un'altra unità produttiva.

La sottostazione elettrica, esistente, è ubicata nel territorio Comunale di Pietracatella e dovrà essere ampliata per posizionare un trasformatore aggiuntivo.

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 di distacco alla radice durante il funzionamento alla massima velocità di rotazione (con vento alla velocità di *cut-out*).

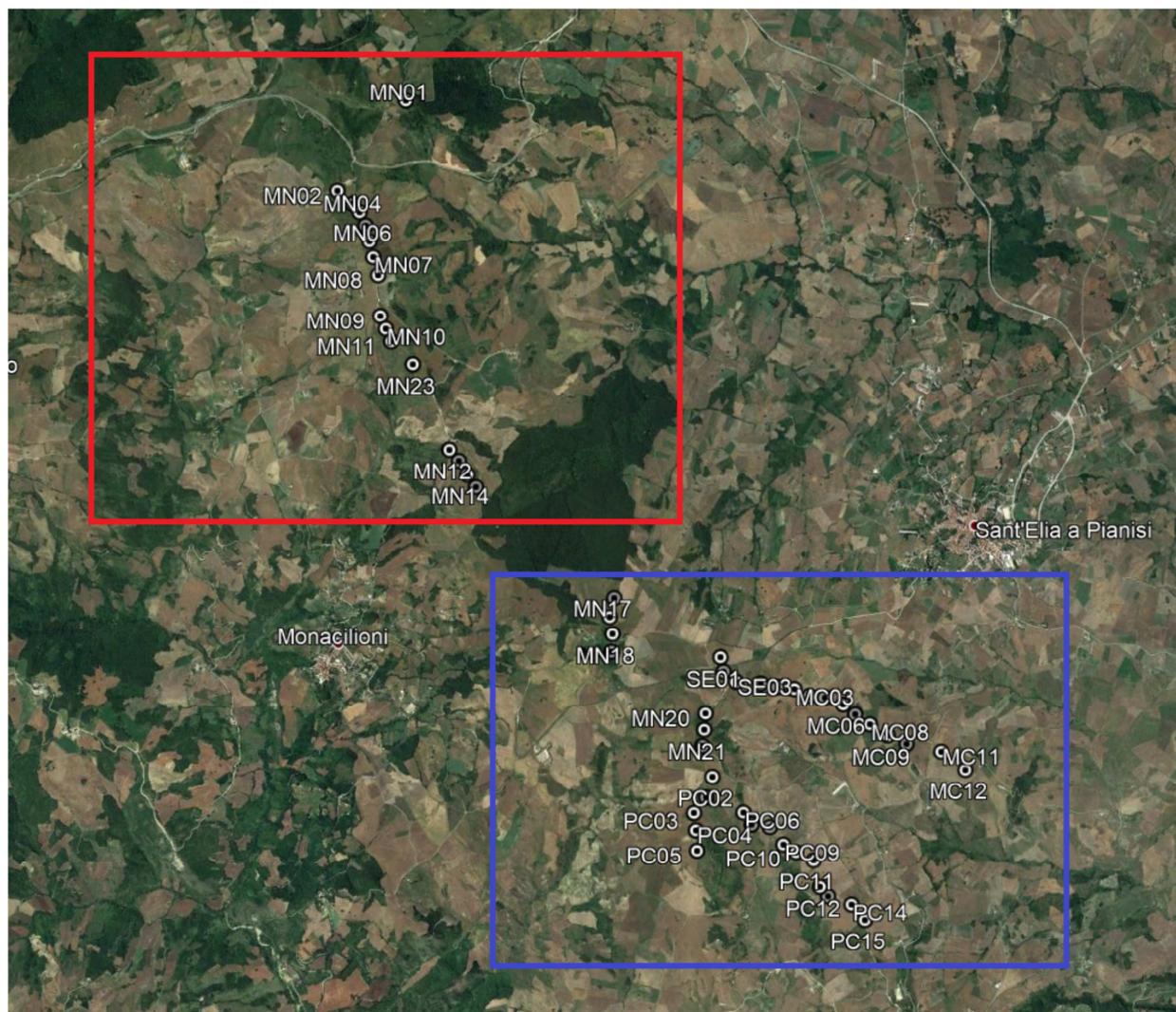
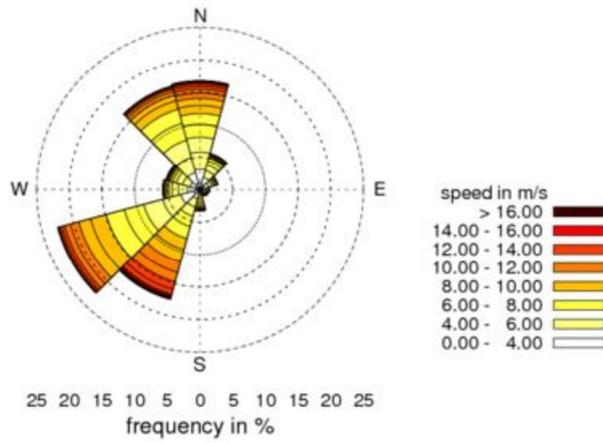


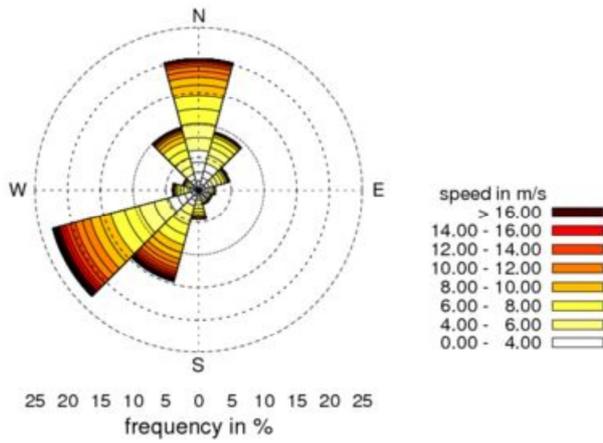
Figura 1: Layout generale dell'impianto (dal Rif.[1])

Le rose dei venti per le cinque torri di misura nel sito eolico in oggetto, tratte dal Rif.[1], sono riportate nella Figura 2 e nella Figura 3: le direzioni prevalenti sono Nord-Nordovest e Ovest-Sudovest.

### MAC03\_50m



### MN01\_50m



### PC04\_50m

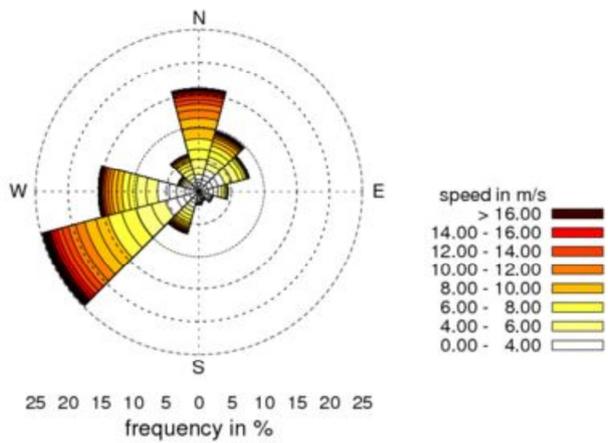
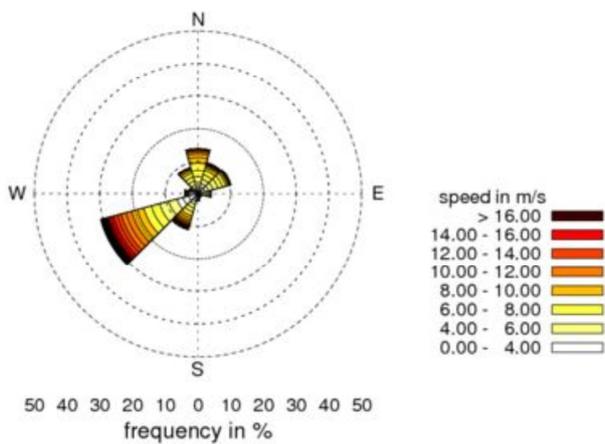


Figura 2: Tabelle di frequenze per le torri di misura MAC03, MN01 e PC04 (dal Rif.[1])

## MN06\_50m



## SE02\_50m

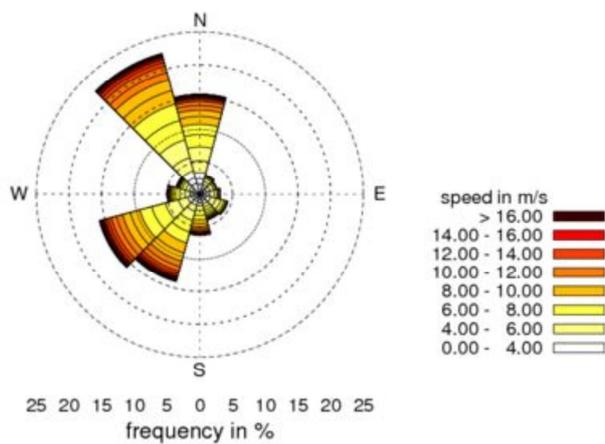


Figura 3: Tabelle di frequenze per le torri di misura MN06 e SE02 (dal Rif.[1])

## 2 RIFERIMENTI

- [1] ERG: STUDIO ANEMOLOGICO – “Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità”. Doc. MAC-ENG-REL-0001-0 del 15/12/2018.
- [2] Siemens-Gamesa: “Preliminary Developer Package, SG 4.5-145” Document ID: GD372187 R0 2018.04.30
- [3] Vestas: “Early Customer Engagement Document V136-4.2 MW 50/60 Hz” Document no.: 0066-5416 V02 2017-06-22.
- [4] Nordex: “Technical description Wind turbine class K08 delta N131/3900 IEC S” E0003806613 Revision 03 / 2017-11-30
- [5] H.Braam, L.W. Rademakers: “Guidelines on the environmental risk of wind turbines in the Netherlands”; ECN Wind Energy.
- [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 – 53<sup>rd</sup> 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  
 Corda massima 4 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 4).
- 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 kg/m<sup>3</sup>

CD = 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 4: l'asse longitudinale della pala, in rotazione antioraria con velocità  $\omega$ , all'istante del distacco è inclinato di un angolo  $\alpha$  rispetto all'orizzontale.

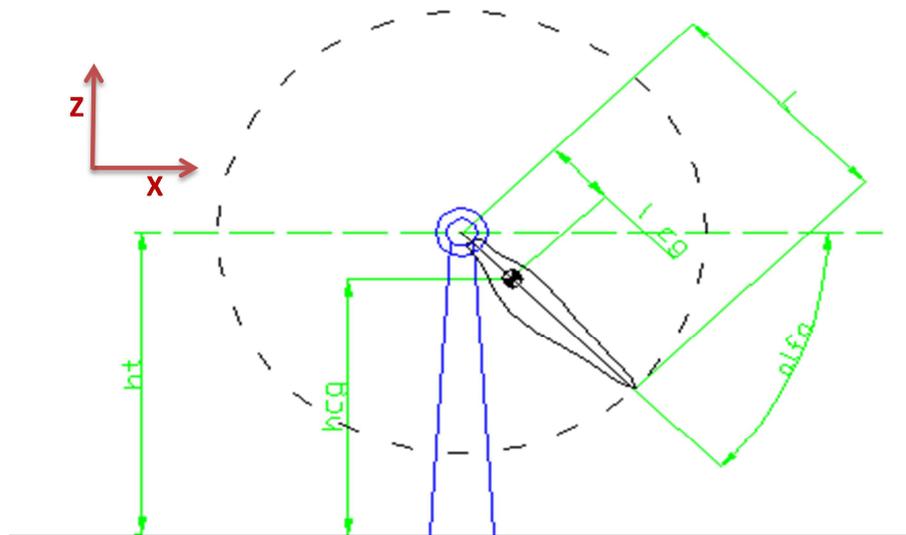


Figura 4: Schema generale

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:

$$h_{cg} = h_t - L/3 \sin \alpha \quad [\text{m}]$$

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.

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 gitata massima.

Le rose dei venti (Figura 2 e Figura 3) indicano che i venti predominanti hanno direzioni Nord-Nordovest e Ovest-Sudovest.

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

## 4 CALCOLO DELLA GITTATA DELLA PALA

Sulla base delle condizioni definite al capitolo precedente si calcola la traiettoria del centro di massa (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  $142 \text{ m}^2$

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 5 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  $20^\circ$  e  $70^\circ$ . Le traiettorie sono state calcolate considerando  $CD=1$  (valore ritenuto rappresentativo della 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 5 si evidenzia che la gittata massima del CG della pala si determina in corrispondenza di  $\alpha=60^\circ$ . Tale gittata massima vale:

- 161 m per un dislivello nullo rispetto alla piazzola
- 183 m per un dislivello di 50 m rispetto alla piazzola
- 203 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 5 riguarda solo la traiettoria del 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 delle pala.

Al momento del distacco la pala possiede una velocità angolare pari a  $1.51 \text{ rad/s}$  ( $86.5 \text{ gradi/sec}$ ): ammettendo che tale velocità si conservi, all'istante di contatto con il terreno l'angolo di inclinazione della pala sarà:

$$\alpha' = \alpha - \omega t = 60 - 86.5 t \text{ (considerando il caso } \alpha = 60^\circ \text{)}.$$

<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.

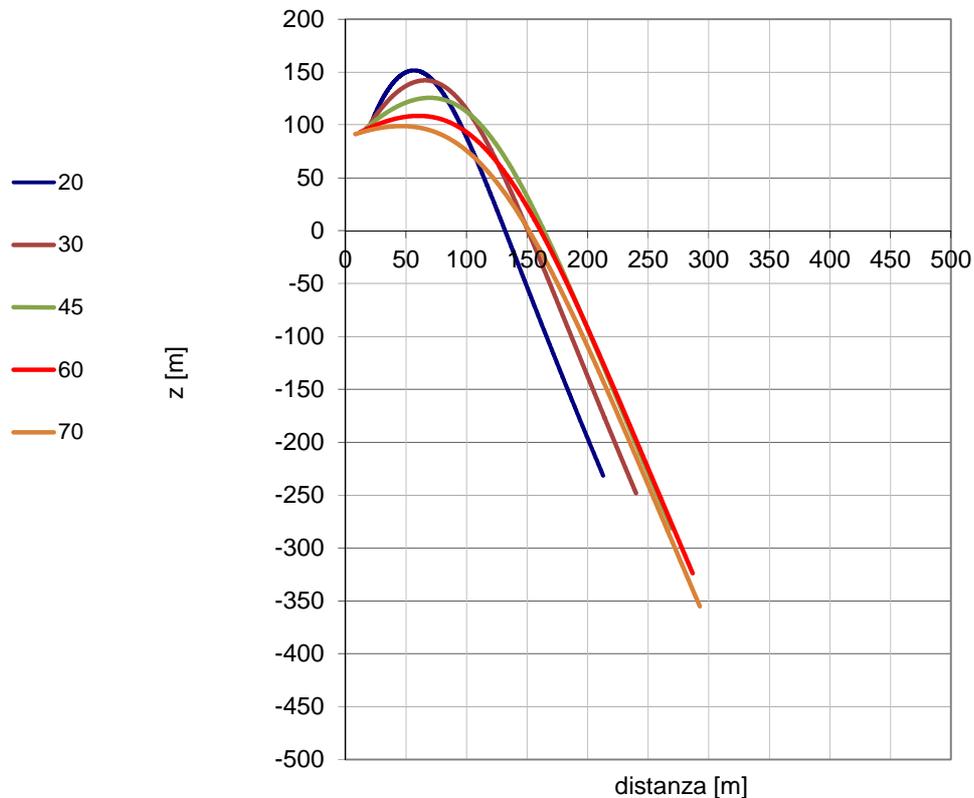


Figura 5: Traiettorie del CG della pala

Nella Figura 6 sono riportate (per il caso con  $\alpha = 60^\circ$ ) 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 tip potrà quindi estendere la gittata sino a circa 240 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 135 m. La root potrà quindi estendere la gittata sino a circa 205 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 250 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.

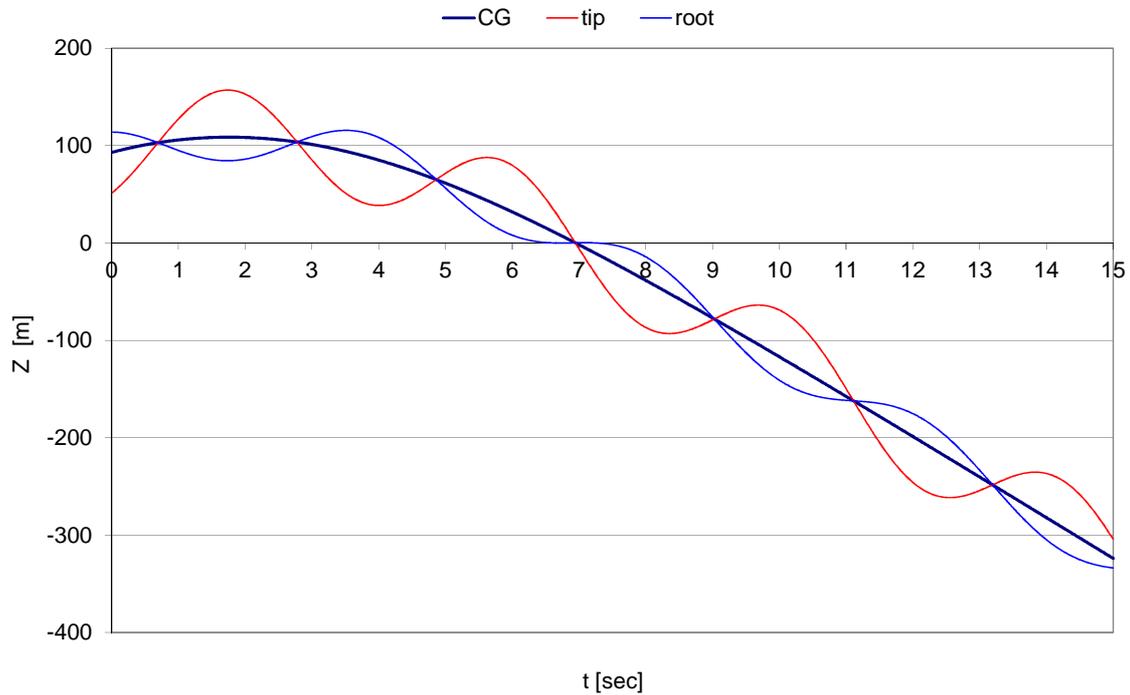


Figura 6: Evoluzione temporale delle quote di CG, tip e root della pala (CD=1)

## 5 CONCLUSIONI

L'analisi presentata nel presente rapporto, emesso come elaborato attinente al progetto definitivo delle opere civili per l'impianto eolico di Macchia Valfortore – Monacilioni, Pietracatella e S. Elia, riguarda la valutazione della gittata massima raggiungibile da una pala di generatore eolico nel caso di distacco improvviso durante il funzionamento alla massima velocità di rotazione e vento pari al valore di cut-out, vedasi *Figura 7* per l'elenco delle macchine considerate.

I risultati dei calcoli indicano che la gittata massima della pala risulta pari a 250 m per un dislivello sino a -100 m e 205 m con dislivello di -50 m.

Con riferimento a tale circostanza l'edificio più vicino si trova in corrispondenza della macchina R-PC05 ed è posto a 248 metri con un dislivello di - 50 m, quindi ad una distanza superiore al valore calcolato di 205 m.

Non vi sono quindi edifici su cui la pala possa impattare.

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

Sigla	Coordinate UTM WGS84 F33		Quota (m)
	Est	Nord	
WTG	E	N	
R-MN01	484264	4610597	847,5
R-MN02	484559	4610280	858,0
R-MN03	484652	4609440	896,5
R-MN04	484932	4609110	861,5
R-MN05	485166	4608404	803,0
R-PC01	487339	4605734	874,0
R-PC02	487706	4605237	795,1
R-PC03	488159	4604994	764,6
R-PC04	488447	4604607	732,8
R-PC05	488695	4604355	714,0
R-MC01	487806	4606447	857,8
R-MC02	488198	4606318	826,4
R-MC03	488599	4606150	790,1
R-MC04	488928	4605945	735,5
R-MC05	489322	4605787	693,7
R-MC06	489844	4605714	631,7

Figura 7: Posizioni e quote degli aerogeneratori (dal Rif.[1])