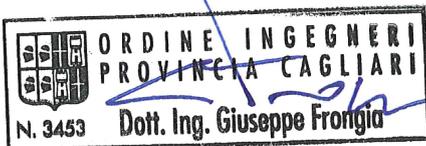


COMMITTENTE WPD Piano d'Ertilia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)			COD. ELABORATO WPD-B-RC12
ELABORAZIONI I.A.T. Consulenza e progetti S.r.l. con socio unico - Via Santa Margherita 4, 09124 Cagliari Tel./Fax +39.070.658297 Web www.iatprogetti.it	PAGINA 1 di 12		

REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO
DA 50.4 MW IN LOCALITÀ "MAMONE"
- COMUNI DI BITTI (NU) E BUDDUSÒ (SS) -



OGGETTO PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI
PROGETTAZIONE I.A.T. CONSULENZA E PROGETTI S.R.L. ING. GIUSEPPE FRONGIA	GRUPPO DI LAVORO Ing. Giuseppe Frongia (coordinatore e responsabile) Ing. Marianna Barbarino Ing. Enrica Batzella Ing. Antonio Dedoni Ing. Gianluca Melis Ing. Emanuela Spiga Dott. Mauro Casti Dott. Maurizio Medda Dott. Matteo Tatti Dott. Geol. Mauro Pompei Dott. Geol. Maria Francesca Lobina Ing. Andrea Cappai

Cod. pratica 2019/0183

Nome File: **WPD-B-RC12**_Relazione sulla gittata degli elementi rotanti

0	30/06/2020	Emissione per procedura di VIA	IAT	GF	GF
REV.	DATA	DESCRIZIONE	ESEG.	CONTR.	APPR.

Disegni, calcoli, specifiche e tutte le altre informazioni contenute nel presente documento sono di proprietà della I.A.T. Consulenza e progetti s.r.l. Al ricevimento di questo documento la stessa diffida pertanto di riprodurlo, in tutto o in parte, e di rivelarne il contenuto in assenza di esplicita autorizzazione.

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 2 di 12	

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
2	ESPERIENZE E NOTE STATISTICHE	4
2.1	Distacco di una delle tre pale dal rotore.....	4
2.2	Rottura di un'estremità della pala.....	5
3	GEOMETRIA DEL PROBLEMA	6
4	DATI DI BASE PER IL CALCOLO	8
5	CALCOLO DELLA GITTATA	9
6	CONSIDERAZIONI AGGIUNTIVE E VALUTAZIONE CONCLUSIVA.....	11
1	ALLEGATI GRAFICI DI RIFERIMENTO.....	12

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)	 think energy	OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 3 di 12	

1 INTRODUZIONE

L'esperienza di pluriennale esercizio dei moderni impianti eolici attesta come le turbine di grande taglia siano installazioni estremamente affidabili sotto il profilo meccanico-strutturale nonché ambientalmente sicure.

In accordo con quanto suggerito dalle Linee Guida Nazionali sulle Fonti Rinnovabili (DM 10/09/2010), nel seguito sarà condotta una stima approssimativa della distanza massima che può essere raggiunta da una pala di un generatore eolico tipo *GE 4.2 - 158* con altezza al mozzo di 149 m, nell'ipotesi di distacco dell'intera pala durante condizioni nominali di funzionamento dello stesso.

Premesso che la determinazione della reale distanza raggiunta da una pala distaccatasi dal rotore di un aerogeneratore (c.d. gittata), in funzione delle condizioni iniziali e al contorno, è estremamente complessa, a causa dell'influenza di un elevato numero di fattori, le stime semplificate di seguito condotte, hanno l'obiettivo di pervenire ad un valore indicativo di riferimento e di determinare l'incertezza approssimativa del dato stesso.

In particolare, lo studio è stato condotto calcolando la gittata del centro di gravità (stimato) della pala, a partire dalle condizioni iniziali teoriche di massima gittata ($\pm 45^\circ$ dall'asse orizzontale con pala in salita) e con ipotesi semplificative circa gli effetti della resistenza/portanza aerodinamica.

I calcoli di seguito illustrati pervengono, in ogni caso, ad una stima conservativa circa la portata del fenomeno includendo solo le forze d'inerzia ed escludendo le forze viscosse. Al riguardo, verifiche sperimentali condotte da uno dei principali costruttori di aerogeneratori (Vestas) sulla gamma dei propri modelli di turbine in esercizio indicano come le forze di resistenza che si esercitano sulla pala fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20% rispetto a quella stimata secondo le ipotesi di calcolo sopra indicate.

Il distacco o la rottura della pala sono eventi che si verificano per condizioni operative al di fuori del normale *range* di funzionamento delle macchine. Gli aerogeneratori per i quali si prevede l'installazione nel sito di Bitti sono provvisti di sistemi di arresto che intervengono quando le condizioni di funzionamento sono tali da compromettere la funzionalità della macchina e la sicurezza pubblica.

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 4 di 12	

2 ESPERIENZE E NOTE STATISTICHE

Ai fini di un corretto inquadramento delle problematiche qui esaminate, si riportano di seguito alcune note statistiche ricavate dall'esperienza operativa di Vestas, ragionevolmente trasponibili ai modelli in commercio prodotti dalle principali case costruttrici.

Quanto segue è stato redatto al fine di presentare alcuni degli elementi fondamentali per valutare la reale possibilità del distacco di una pala dagli aerogeneratori.

Sotto questo profilo deve in primo luogo evidenziarsi come, dal punto di vista progettuale, la combinazione di coefficienti di sicurezza adottati, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettino quanto prescritto dalla norma IEC61400-1 (turbine safety standard). In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate "fail safe".

L'esperienza pratica su tutta la flotta operativa Vestas di 4.959 unità (Giugno 2007) ha mostrato che in caso di distacco di pala il moto è stato di tipo "rotazionale complesso" e le distanze raggiunte sono normalmente state inferiori a quelle stimate con i calcoli semplificati qui riportati.

Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi sono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata dai costruttori per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente.

2.1 *Distacco di una delle tre pale dal rotore*

Questo tipo di incidente, comportante il distacco di una pala completa dal rotore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo.

In occasione di tali tipi di evento, in base ai citati dati Vestas, la pala ha raggiunto il terreno ad una distanza inferiore ai cento metri.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che assolve sostanzialmente a funzioni di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è di regola previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

Sulla base dei dati operativi citati, gli eventi incidentali sono stati attribuiti a errati interventi di

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 5 di 12	

manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore. Quindi l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.

2.2 Rottura di un'estremità della pala

Questo tipo di incidente è stato quasi sempre riscontrato in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

I moderni aerogeneratori di grande taglia sono di regola provvisti di un sistema di conduzione della corrente di fulmine dalle pale collegato ad un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche scongiurando danni alle pale.

In qualche caso, laddove la corrente di fulmine ecceda i valori di progetto (fissati dalle norme internazionali), si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci. Tale condizione, peraltro, non determina normalmente il distacco dal corpo della pala.

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it		TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 6 di 12

3 GEOMETRIA DEL PROBLEMA

La stima della gittata di un elemento rotante si basa sull'ipotesi di considerare lo stesso come un corpo rigido, ovvero un insieme di particelle soggette a forze tali da mantenere costanti nel tempo le loro distanze relative.

Nello studio si considera il moto del corpo bidimensionale, traslatorio e curvilineo, rappresentato da un punto materiale (assunto coincidente con il baricentro dell'elemento rotante) lanciato in aria obliquamente sottoposto all'accelerazione di gravità costante "g" diretta verso il basso ed ad velocità iniziale impressa dalla rotazione della pala.

Il calcolo della gittata massima in caso di distacco di una pala dell'aerogeneratore segue il principio della balistica applicata al moto dei proiettili. Si sottolinea come i calcoli qui riportati siano stati condotti considerando nulla la resistenza d'attrito con l'aria, nonché gli effetti di portanza aerodinamica. Il moto reale è molto più complesso, in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala).

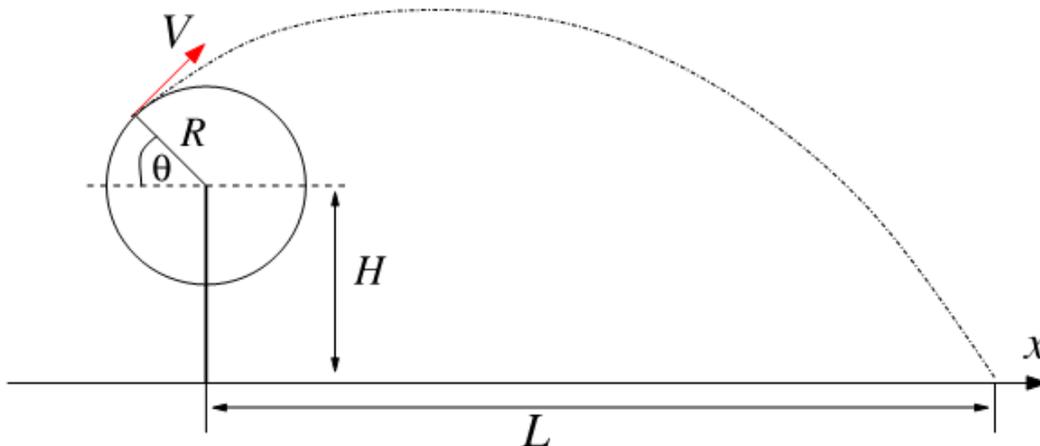


Figura 1 – Schema geometrico del fenomeno di distacco della pala di un aerogeneratore

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità, in accordo con lo schema semplificato di Figura 1, sono le seguenti:

$$d^2x/dt^2=0$$

$$d^2y/dt^2=-g$$

dove $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità.

La legge del moto soluzione di queste equazioni è la seguente:

$$x(t) = x_0 + v_x t \tag{1}$$

$$y(t) = y_0 + v_y t - 1/2 g t^2 \tag{2}$$

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 7 di 12	

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo θ e dalla velocità tangenziale V del centro di massa della pala al momento del distacco. Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$x_0 = -R \cos(\theta)$$

$$y_0 = H_m + R \sin(\theta) \text{ con } H_m \text{ altezza al mozzo dell'aerogeneratore}$$

$$v_x = V \sin(\theta)$$

$$v_y = V \cos(\theta)$$

La gittata L è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo del centro di massa della pala.

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 8 di 12	

4 DATI DI BASE PER IL CALCOLO

I dati di base sono quelli caratteristici dell'aerogeneratore *GE 4.2-158*. La lunghezza della pala è pari a circa 77 m e l'altezza della torre del generatore eolico, all'asse di rotazione, 149 m.

La massa della pala di riferimento è pari indicativamente a 25.000 kg; il centro di massa della pala risulta approssimativamente posizionato ad una distanza dal centro di rotazione pari ad un terzo della lunghezza della pala.

Si è assunta per il calcolo una velocità massima di rotazione V di 10 rpm, lievemente superiore a quella massima indicata per l'aerogeneratore di riferimento (9.3 rpm, corrispondenza ad una velocità massima periferica al tip del rotore pari a 74.5 m/s).

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 9 di 12	

5 CALCOLO DELLA GITTATA

Nel caso in esame si suppone che l'incidentale distacco della pala avvenga nelle condizioni più gravose ovvero:

- alla velocità massima del rotore, pari a 10 giri/minuto;
- nel punto di ascissa e ordinata in cui la gittata è massima, con angolo $\theta = 45^\circ$;
- con il centro di massa posizionato ad $1/3$ della lunghezza della pala, in prossimità del mozzo;

L'aerogeneratore previsto, ossia il modello *GE 4.2-158*, possiede:

- altezza al mozzo dell'aerogeneratore $H_m = 149$ m;
- lunghezza della pala dell'aerogeneratore $L_p = 77$ m;
- distanza dal mozzo del centro di massa della Pala $D_{cm} = L_p / 3 = 25,66$ m;
- Massima Velocità Angolare Rotore $V_{ang} = 10 \text{ Giri/min} = 10 \times 2 \pi / 60 = 1,05 \text{ Rad/sec}$;

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate agenti sulla pala. La pala, quindi, quando inizierà il suo moto, continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità.

La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano. La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco iniziale.

Assunto un sistema di riferimento con origine sul terreno in corrispondenza dell'asse della torre, l'ordinata del centro di massa al momento del distacco della pala è data dall'altezza del mozzo sommata alla distanza verticale del centro di massa della pala rispetto al suo centro di rotazione:

$$y_0 = H_m + D_{cm} \cdot \sqrt{2}/2 = 167,1 \text{ m}$$

Analogamente l'ascissa del centro di massa al momento del distacco risulta:

$$x_0 = - D_{cm} \cdot \sqrt{2}/2 = -18,1 \text{ m}$$

La Velocità tangenziale posseduta dal Centro di Massa V è desunta dalla Velocità Angolare V_{ang} , ossia:

$$V = V_{ang} \times D_{cm} = 26,88 \text{ m/s}$$

Le componenti verticale (V_y) ed orizzontale (V_x) di tale velocità lineare al Centro di Massa si

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 10 di 12	

ottengono conseguentemente:

$$V_x = V_y = v * \sqrt{(2)/2} = 19,00 \text{ m/s}$$

Il tempo di decelerazione verticale T_y necessario perché la componente verticale della velocità sia nulla è dato dalla formula:

$$T_y = V_y / 9,8 \text{ m/sec}^2 = 1,94 \text{ s}$$

L'altezza massima H_{max} raggiunta si ottiene dalla formula:

$$H_{max} = y_0 + V_y * T_y - 1/2 * g * T_y^2 = 188,55 \text{ m}$$

Il tempo di caduta T_{max} necessario affinché l'elemento rotante precipiti a terra dalla sommità si ottiene dalla relazione:

$$T_{max} = \sqrt{(H_{max} / 4,9 \text{ m/s}^2)} = 6,15 \text{ s}$$

La gittata massima L percorsa dall'elemento rotante distaccatosi dall'aerogeneratore nelle condizioni più sfavorevoli risulta quindi:

$$L = V_x * (T_{max} + T_y) + x_0 = 135 \text{ m}$$

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 11 di 12	

6 CONSIDERAZIONI AGGIUNTIVE E VALUTAZIONE CONCLUSIVA

Nei casi reali, la distanza di impatto a terra calcolata in accordo con il metodo precedentemente illustrato sarà verosimilmente inferiore, sia per le condizioni iniziali al momento del distacco, che non necessariamente saranno quelle teoriche per una gittata massima, sia per i moti rotazionali della pala, dovuti ai momenti delle forze resistenti, che comporteranno ulteriori dissipazioni di energia e condizioni generalmente meno favorevoli per il moto.

A questo riguardo, studi condotti da Vestas¹ attestano come le forze di resistenza che si esercitano sulla pala fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20% rispetto a quella stimata considerando le sole forze inerziali ed escludendo l'attrito. Sotto tale ipotesi la gittata sarebbe stimabile in circa 110 m (20% in meno rispetto al caso ideale).

D'altro canto, si osserva che la distanza calcolata è riferita alla traiettoria del suo baricentro e, pertanto, la stessa andrebbe cautelativamente incrementata dei 2/3 della lunghezza della pala, ossia di circa 51 metri nell'ipotesi che l'impatto a terra avvenga, per effetto delle rotazioni, "di piatto".

In definitiva, sulla base dei calcoli condotti nonché delle predette considerazioni e valutazioni aggiuntive inerenti le possibili dinamiche di impatto, si valuta che la distanza indicativa che può essere raggiunta da una pala di un generatore tipo *GE 4.2-158* che si distacchi dal mozzo in condizioni nominali di funzionamento, sia di circa 160 metri.

Con riferimento alle condizioni insediative dell'area di intervento, contraddistinte dalla locale presenza di fabbricati di supporto alle attività agricole, deve evidenziarsi l'assenza di edifici con presenza di persone entro la distanza indicata rispetto alla prevista ubicazione degli aerogeneratori.

¹ "Blade throw calculation under normal operating conditions" VESTAS AS Denmark July 2001

COMMITTENTE WPD Italia S.r.l. Via Aventino, 102 - Roma (RM)		OGGETTO PARCO EOLICO IN LOC. "MAMONE" PROGETTO DEFINITIVO OPERE CIVILI	COD. ELABORATO WPD-B-RC12
 iat CONSULENZA E PROGETTI www.iatprogetti.it	TITOLO RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	PAGINA 12 di 12	

1 ALLEGATI GRAFICI DI RIFERIMENTO

WPD-B-TC1	Inquadramento geografico intervento
WPD-B-TC2	Inquadramento territoriale intervento
WPD-B-TC3	Inquadramento urbanistico
WPD-B-TC4	Estratto mappa catastale
WPD-B-TC5	Identificazione interventi sulla viabilità di accesso al sito
WPD-B-TC6	Viabilità ed aree di cantiere - Inquadramento fotografico
WPD-B-TC7	Viabilità ed aree di cantiere - Piano quotato
WPD-B-TC8	Viabilità, piazzole ed aree di cantiere - Planimetria generale e interferenze con il reticolo idrografico
WPD-B-TC9	Viabilità e piazzole - Planimetria di progetto
WPD-B-TC10	Piazzole di macchina - Dettaglio planimetrico, sezioni rappresentative e inquadramento fotografico
WPD-B-TC11	Profili longitudinali viabilità di impianto
WPD-B-TC12	Sezioni trasversali rappresentative viabilità di impianto
WPD-B-TC13	Piazzole aerogeneratori e strade di servizio - Particolari costruttivi
WPD-B-TC14	Opere di regimazione acque superficiali - Planimetria generale
WPD-B-TC15	Schema fondazione aerogeneratore
WPD-B-TC16	Interventi di mitigazione e recupero ambientale - Particolari costruttivi