

Via Diocleziano, 107 - 80125 Napoli  
 Tel. 081.19566613 - Fax. 081.7618640  
 www.newgreen.it

**cogein** energy



REGIONE PUGLIA

Comune principale impianto



COMUNE DI ACQUAVIVA  
 DELLE FONTI  
 PROVINCIA DI BARI

Opere connesse

	COMUNE DI GIOIA DEL COLLE PROVINCIA DI BARI		COMUNE DI SANTERAMO IN COLLE PROVINCIA DI BARI
	COMUNE DI LATERZA PROVINCIA DI TARANTO		COMUNE DI CASTELLANETA PROVINCIA DI TARANTO



PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA, AI SENSI DEL D.LGS N. 387 DEL 2003, COMPOSTO DA N° 12 AEROGENERATORI, PER UNA POTENZA COMPLESSIVA DI 72 MW, SITO NEL COMUNE DI ACQUAVIVA DELLE FONTI (BA) E OPERE CONNESSE NEI COMUNI DI GIOIA DEL COLLE (BA), SANTERAMO IN COLLE (BA), LATERZA (TA) E CASTELLANETA (TA)

COD.REG.	DESCRIZIONE
<input type="text"/>	<b>Relazione gittata massima</b>
COD. INT.	
<b>Elab.29</b>	



*Giuseppe De Masi*

<b>REDATTO</b>	<b>VERIFICATO</b>	<b>APPROVATO</b>	<b>REVISIONE</b>
ing. Giuliana Faella	ing. Giuliana Faella ing. Federica Mallozzi dott. Rino Castaldo	ing. Giuseppe De Masi	Rev.0
			<b>DATA</b>
			05/2021

## Sommario

1. Premessa .....	2
2. Equazioni del moto .....	3
2.1 Calcolo della velocità periferica .....	3
2.2 Studio del moto di un punto materiale.....	4
3. Calcolo della gittata massima .....	6
4. Probabilità di accadimento.....	9
5. Conclusioni .....	11

## 1. Premessa

Lo scopo della presente relazione è quello di verificare, mediante un calcolo dettagliato, il rispetto dei requisiti di sicurezza in caso di distacco o rottura accidentale della blade.

La gittata massima di seguito rappresentata, riguarda la verifica rispetto alla realizzazione del campo eolico, sito in Acquaviva delle Fonti (BA), costituito da n°12 aerogeneratori, che genererà una potenza complessiva di 72MW.

Il modello di turbina preso in esame, che ha un diametro di 162 m e un'altezza hub di 119 m, è del tipo Vestas V162 e ha una potenza di 6 MW.

Si precisa che lo studio viene redatto applicando una metodologia di calcolo che abbia rigore scientifico e che consideri tutti i possibili effetti, meccanici ed aerodinamici, che potrebbero influenzare la distanza di gittata della pala.

Nel calcolo, si considerano, a vantaggio di sicurezza, le condizioni più sfavorevoli in cui si possa verificare il distacco della pala dell'aerogeneratore. Nella fattispecie, sarà preso in considerazione l'ipotesi di distacco dell'intera blade, ipotizzando il cedimento dell'attacco bullonato tra la blade e il mozzo.

## 2. Equazioni del moto

La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, nell'ipotesi di distacco accidentale dell'intera blade dell'aerogeneratore di progetto, si basa sull'equazioni di moto del proiettile. Il calcolo considera le condizioni più gravose al contorno, in modo da aumentare il grado di sicurezza. Per tale motivo si considera nullo l'effetto dell'attrito con l'aria.

Nel caso in esame (tipologia Vestas V162) sono state considerate le seguenti caratteristiche dell'aerogeneratore:

Diametro Rotore [m]	162
Altezza del mozzo [m]	119
Inclinazione asse rotore [°]	6
Potenza nominale [MW]	6
Velocità rotore nominale[rpm]	12,1
Velocità di Cut-in [m/s]	3
Velocità di Cut-out [m/s]	24

Il moto del proiettile è la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione modulo  $g$ ) in direzione verticale.

La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo.

### 2.1 Calcolo della velocità periferica

Per il calcolo della gittata, elemento fondamentale è rappresentato dalla velocità angolare media  $\omega$  ovvero l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo.

Tale velocità è data dal  $n$  il numero di giri al minuto primo, compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$  radianti, per  $n$  giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, ovvero la velocità angolare  $\omega$  al minuto del corpo in movimento.

Pertanto la velocità angolare è data da:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/sec}$$

Mentre la velocità periferica in m/s di un corpo rotante, considerando la velocità massima

del rotore di 12,1 giri al minuto, corrisponde a:

$$v_0 = \omega \cdot r_g = (2\pi \cdot n \cdot r_g) / 60 = 34,19 \text{ m/s}$$

Dove:

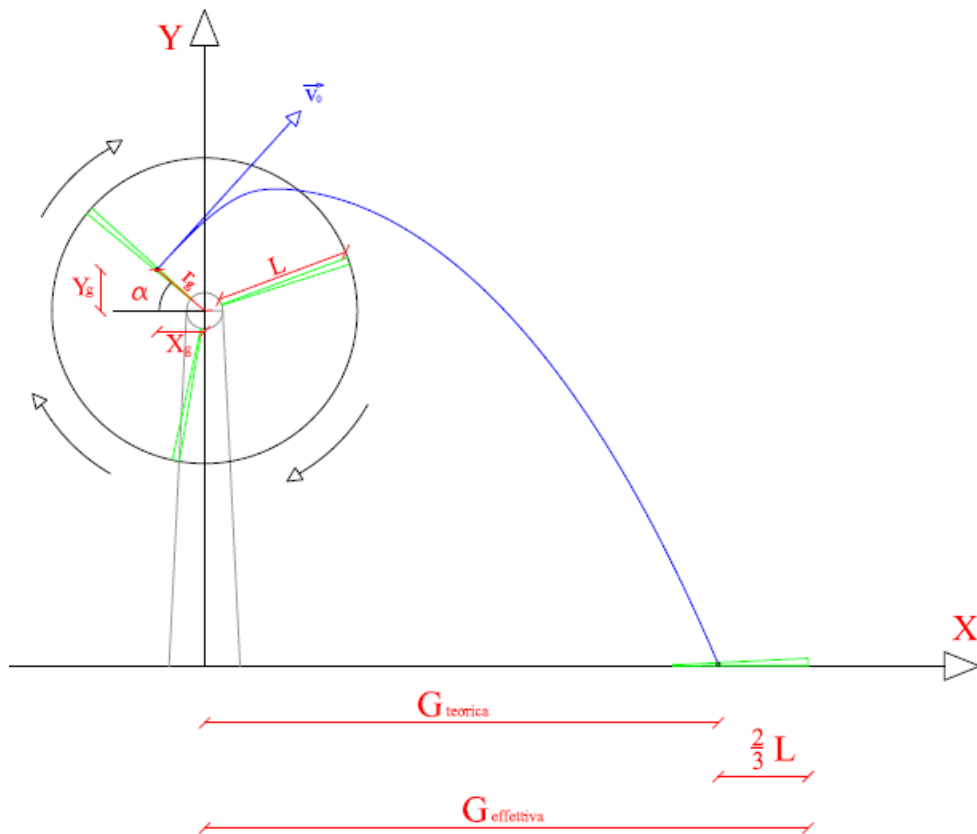
$$r_g = \frac{D}{2} - L + \frac{L}{3}$$

Con L pari alla lunghezza della pala;  $r_g$  rappresenta la posizione del baricentro pari ad  $1/3$  della lunghezza della pala più raggio mozzo. Infatti, date le caratteristiche geometriche della pala e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, in tal caso  $r_g = 27$  m a partire dal mozzo, essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a 81 m. L'oggetto che accidentalmente si distacca è pari alla lunghezza dell'intera blade fino all'attacco con il mozzo, e quindi è pari a 81,00 m con uno spessore variabile fino all'estremità della pala.

## 2.2 Studio del moto di un punto materiale

Considereremo inizialmente il moto bidimensionale di un punto materiale tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

Sceghieremo un sistema di riferimento così come in figura:



Il calcolo della gittata, quindi, è effettuato in funzione dell'angolo di inclinazione della pala rispetto all'orizzontale, in senso orario e ponendo l'angolo di  $0^\circ$  tra il 3° e il 4° quadrante.

La velocità  $v_0$  ha componenti nelle due direzioni:

$$v_{x0} = v_0 \cos (90 - \alpha) = v_0 \sin \alpha$$

$$v_{y0} = v_0 \sin (90 - \alpha) = v_0 \cos \alpha$$

con  $\alpha$  pari all'angolo della pala rispetto all'orizzontale.

La gittata è la distanza percorsa dal punto materiale in direzione  $x$  prima di toccare terra.

Le equazioni del moto di un punto materiale, soggetto unicamente alla forza di gravità, risultano:

$$x=0$$

$$y=-g$$

con  $g$  accelerazione di gravità.

La soluzione delle equazioni suddette è la legge del moto, ossia:

$$x(t) = x_0 + v_x \cdot t$$

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

dove  $x_0$  e  $y_0$  rappresentano la posizione iniziale del punto materiale e  $v_x$  e  $v_y$  la velocità del punto materiale. Il punto materiale avrà una traiettoria che intercetta il suolo al tempo  $t$ , tale per cui  $y(t) = 0$ .

Pertanto, dalla legge del moto di cui sopra si ottiene:

$$t = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0 \cdot g}$$

Dalla legge del moto si ottiene che:

$$G = x(t)$$

Sostituendo  $t$  con l'espressione ricavata in precedenza, si ottiene:

$$G = \frac{v_{x0} (v_{y0} + \sqrt{v_{y0}^2 + 2 \cdot g \cdot H_G})}{g} - X_g$$

Dove

$$H_G = H_{\text{torre}} + Y_g \text{ (altezza di lancio)}$$

$$\text{con } Y_g = r_g \sin \alpha$$

La gittata effettiva sarà pari alla gittata teorica  $G + 2/3L$ .

### 3. Calcolo della gittata massima

Nel calcolo sono considerate le seguenti ipotesi:

- baricentro posizionato ad  $1/3$  della lunghezza della pala;
- assenza di attriti viscosi durante il volo;
- distacco alla rotazione di funzionamento massima;

- vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente a quella massima di funzionamento;
- assenza di effetti di “portanza” del profilo alare;
- moto del sistema di tipo rigido non vincolato;
- trascurabili le forze di resistenza dell’aria;
- le componenti dell’accelerazione saranno  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ ;
- le coordinate del punto di partenza del corpo coincidenti con il punto di attacco bullonato blade-mozzo.

Si riportano, nella tabella che segue, i valori di gittata effettiva risultanti:

Angolo $\alpha$ [°]	vx0 [m/s]	vy0 [m/s]	Hg [m]	Gittata Effettiva [m/s]
0	0,00	34,21	119,00	27,00
1	0,60	34,21	119,47	32,69
2	1,19	34,19	119,94	38,40
3	1,79	34,17	120,41	44,12
4	2,39	34,13	120,88	49,84
5	2,98	34,08	121,35	55,55
6	3,58	34,02	121,82	61,26
7	4,17	33,96	122,29	66,97
8	4,76	33,88	122,76	72,65
9	5,35	33,79	123,22	78,32
10	5,94	33,69	123,69	83,96
11	6,53	33,58	124,15	89,57
12	7,11	33,46	124,61	95,15
13	7,70	33,34	125,07	100,69
14	8,28	33,20	125,53	106,18
15	8,85	33,05	125,99	111,63
16	9,43	32,89	126,44	117,03
17	10,00	32,72	126,89	122,38
18	10,57	32,54	127,34	127,66
19	11,14	32,35	127,79	132,88
20	11,70	32,15	128,23	138,04
21	12,26	31,94	128,68	143,12
22	12,82	31,72	129,11	148,13
23	13,37	31,49	129,55	153,06
24	13,92	31,25	129,98	157,91



25	14,46	31,01	130,41	162,67
26	15,00	30,75	130,84	167,35
27	15,53	30,48	131,26	171,93
28	16,06	30,21	131,68	176,42
29	16,59	29,92	132,09	180,82
30	17,11	29,63	132,50	185,11
31	17,62	29,33	132,91	189,30
32	18,13	29,01	133,31	193,39
33	18,63	28,69	133,71	197,36
34	19,13	28,36	134,10	201,23
35	19,62	28,02	134,49	204,99
36	20,11	27,68	134,87	208,64
37	20,59	27,32	135,25	212,16
38	21,06	26,96	135,62	215,58
39	21,53	26,59	135,99	218,87
40	21,99	26,21	136,36	222,05
41	22,45	25,82	136,71	225,11
42	22,89	25,42	137,07	228,04
43	23,33	25,02	137,41	230,85
44	23,77	24,61	137,76	233,54
45	24,19	24,19	138,09	236,11
46	24,61	23,77	138,42	238,55
47	25,02	23,33	138,75	240,87
48	25,42	22,89	139,06	243,07
49	25,82	22,45	139,38	245,14
50	26,21	21,99	139,68	247,09
51	26,59	21,53	139,98	248,92
52	26,96	21,06	140,28	250,62
53	27,32	20,59	140,56	252,20
54	27,68	20,11	140,84	253,66
55	28,02	19,62	141,12	255,00
56	28,36	19,13	141,38	256,23
57	28,69	18,63	141,64	257,33
58	29,01	18,13	141,90	258,32
59	29,33	17,62	142,14	259,19
60	29,63	17,11	142,38	259,95
61	29,92	16,59	142,61	260,59
62	30,21	16,06	142,84	261,13
63	30,48	15,53	143,06	261,56
64	30,75	15,00	143,27	261,88
65	31,01	14,46	143,47	262,10
66	31,25	13,92	143,67	262,21
67	31,49	13,37	143,85	262,23

68	31,72	12,82	144,03	262,14
69	31,94	12,26	144,21	261,96
70	32,15	11,70	144,37	261,69
71	32,35	11,14	144,53	261,33
72	32,54	10,57	144,68	260,88
73	32,72	10,00	144,82	260,34
74	32,89	9,43	144,95	259,72
75	33,05	8,85	145,08	259,02
76	33,20	8,28	145,20	258,24
77	33,34	7,70	145,31	257,39
78	33,46	7,11	145,41	256,46
79	33,58	6,53	145,50	255,47
80	33,69	5,94	145,59	254,40
81	33,79	5,35	145,67	253,28
82	33,88	4,76	145,74	252,09
83	33,96	4,17	145,80	250,84
84	34,02	3,58	145,85	249,53
85	34,08	2,98	145,90	248,17
86	34,13	2,39	145,93	246,76
87	34,17	1,79	145,96	245,30
88	34,19	1,19	145,98	243,79
89	34,21	0,60	146,00	242,24
90	34,21	0,00	146,00	240,65

Dall'analisi della gittata, si deduce che la massima distanza percorsa dall'elemento si ottiene secondo un angolo di 67°, con un valore massimo di gittata pari a **262,23 m**.

#### 4. Probabilità di accadimento

Il processo di rottura di un aerogeneratore è un evento raro, risultato di una catena di eventi, la cui probabilità totale è data dalla combinazione delle probabilità dei meccanismi intermedi, attraverso i quali si giunge al risultato finale. Ogni evento individuale della catena è visto con le sue conseguenze in modo che il prodotto della probabilità di occasione di ogni individuale evento fornisce la relativa probabilità di danno. Questo valore può essere messo in relazione con il valore di soglia, che dipende dall'oggetto individuale da proteggere. La relazione, che traduce il concetto ora esposto, si basa sulla seguente disuguaglianza.

$$P_{so} > P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4$$

- Pso è il valore di soglia relativo all'oggetto da difendere;
- P1 è la probabilità di occasione dell'evento incidentale accaduto alla turbina eolica;
- P2 è la probabilità di occasione dell'urto tra l'oggetto da proteggere e la pala;
- P3 è la probabilità di occasione della condizione di vento sfavorevole o dei condizionamenti ambientali;
- P4 la probabilità di occasione relativa ad altre cause, come tolleranze di costruzione, etc.

In conclusione, in relazione al rischio di rottura, si riportano le risultanze del documento “Analysis Of RiskInvolved Incidents Of Wind Turbines”, allegato alla “Guide for Risk-Based Zoning of Wind Turbines”, elaborato nel 2005 dall' ECN (Energy Research Centre of the Netherlands) sulla base dei dati relativi a produzione di energia eolica, incidenti e manutenzione raccolti dallo ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) in Germania e dall' EMD (Energie- og Miljødata) in Danimarca. L'ECN ha analizzato le informazioni di incidenti registrate su un campione molto largo di turbine eoliche in Danimarca e Germania, determinando le frequenze di:

- rottura di una pala;
- rottura della punta e di piccole parti;
- rottura della torre alla base;
- caduta del rotore o della navicella;
- caduta di piccole parti dal rotore o dalla navicella.

La probabilità di rottura della pala è stata suddivisa in diverse condizioni d'uso:

- alla velocità nominale;
- durante la frenata meccanica;
- in condizione di overspeed.

I risultati dell'analisi, riportati nella tabella sottostante, mostrano come la probabilità di rottura della pala sia pari a circa 0,00084%. Per quanto riguarda la probabilità di rottura in overspeed, è stata utilizzata la stima di studi precedenti, determinata moltiplicando la probabilità di guasto della rete elettrica (5 volta in un anno) con la probabilità di rottura del primo sistema di frenata ( $10^{-3}$  per intervento) e del secondo sistema di frenata ( $10^{-3}$  per intervento) e per la probabilità di rottura della pala in queste condizioni (100%).

Part	Failure frequency per turbine per year			Maximum throw distance [m] (reported and confirmed)
	Expected Value	95% upper limit	Recommended Risk Analysis Value [1/yr]	
Entire blade	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	150
<i>Nominal rpm</i>			$4.2 \cdot 10^{-4}$	
<i>Mechanical braking</i>			$4.2 \cdot 10^{-4}$	
<i>Overspeed</i>			$5.0 \cdot 10^{-6}$	
Tip or piece of blade	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	500
Tower	$5.8 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	Shaft height + half diameter
Nacelle and/or rotor	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	Half diameter
Small parts from nacelle	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	Half diameter

Tabella - Frequenza di accadimento rottura aerogeneratore

## 5. Conclusioni

La distanza massima raggiunta dalla pala nell'ipotesi accidentale di cedimento dell'attacco bullonato blade-mozzo, e quindi della pala che si rompe a seguito di un evento eccezionale, è di **262,23 m**. Si precisa che nessuna civile abitazione o edificio (cat. D) è posizionato a una distanza minore o uguale a quella di gittata massima dalle turbine di progetto: pertanto risulta verificata la sicurezza nel caso di rottura degli elementi rotanti.

Inoltre, nessuna strada provinciale o statale è posizionata ad una distanza equivalente a quella di massima gittata.

Per la verifica di tali distanze si rimanda, per un maggior dettaglio, all'elaborato ELAB.29.1 "Ubicazione dei ricettori sensibili e verifica del rispetto dei parametri massimi di gittata nel caso di rottura degli elementi rotanti".