



Progetto per la realizzazione di un impianto per la produzione di energia elettrica da **fonte eolica**, ai sensi del Dlgs. n.387 del 2003, composto da n°10 aerogeneratori, per una potenza di 60 MW, sito nel comune di **Cellere(VT)**



REGIONE
LAZIO

PROPONENTE



COMUNE DI
CELLERE

Cogein
energy

Cogein Energy S.r.l.

Via Diocleziano, 107 - 80125 Napoli

Tel. 081.19566613 - Fax. 081.7618640

www.newgreen.it

compinvestimenti@libero.it

cogeinenergy@pec.it



COMUNE DI
PIANSANO

ELABORATO

ELAB.5

ANALISI ROTTURA DEGLI ELEMENTI ROTANTI



COMUNE DI
ARLENA DI
CASTRO

SCALA

REVISIONE

0

DATA

03/2022

PROGETTAZIONE

Arch. Raimondo Cascone

REDATTO

Ing. Federica Mallozzi
Ing. Maria Grazia Puocci

VERIFICATO

Ing. Federica Mallozzi

APPROVATO

Arch. Raimondo Cascone



COMUNE DI
TUSCANIA

Sommario

1. Premessa	2
2. Studio della gittata massima	3
2.1 Calcolo della velocità periferica	4
2.2 Studio del moto del proiettile	5
2.2 Calcolo della massima gittata	7
3. Probabilità di accadimento	14
4. Conclusioni	15

1. Premessa

Tale documento riporta lo studio per il calcolo della gittata massima degli elementi rotanti relativi all'impianto eolico da 60 MW composto da 10 aerogeneratori di potenza nominale 6 MW ciascuno, ubicato nel comune di Cellere (VT).

L'obiettivo di tale studio è quello di determinare la distanza che la pala dell'aerogeneratore può raggiungere nel caso di distacco del mozzo durante il funzionamento.

La rottura accidentale di un elemento rotante è da considerarsi un evento raro, tuttavia, al fine della sicurezza è importante stimare la gittata massima degli elementi rotanti. Nel caso remoto di distacco della pala, la rottura si avrebbe in corrispondenza della giunzione tra la blade ed il mozzo.

L'aerogeneratore in questione è del tipo Vestas V162 – 6 MW 50/60 HZ avente le seguenti caratteristiche:

Potenza nominale	60000 kW
Turbina	rotore tripala ad asse orizzontale sopravvento, rotazione oraria velocità variabile
Diametro Rotorico	162 m
Altezza della torre	119 m
Velocità Cut-in Velocità Cut-out	3 m/s 24 m/s
Velocità nominale	12.1 giri al minuto
Freno	3 sistemi autonomi di regolazione pale con alimentazione di emergenza. Freno di tenuta rotore. Blocco rotore.
Torre	tubolare conica in acciaio verniciato suddivisa in più sezioni preassemblate in officina.

Tabella 1- Caratteristiche aerogeneratore

2. Studio della gittata massima

La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, in caso di rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore prende in considerazione le condizioni al contorno più gravose, in maniera tale da aumentare il grado di sicurezza massimo.

Sotto il profilo fisico il calcolo della gittata è assimilabile allo studio del moto di un proiettile, in cui dal punto di vista teorico la gittata maggiore si avrebbe nel caso di distacco nella posizione palare di 45° . In realtà la complessità aerodinamica di un aerogeneratore fa sì che la massima gittata si ottenga per posizioni angolari minori.

Il moto di un proiettile si può pensare come la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione modulo g) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico.

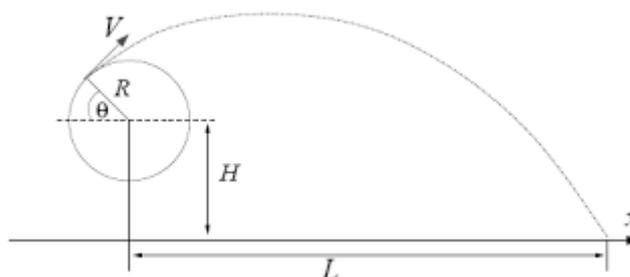


Figura 1 Schematizzazione gittata aerogeneratore

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.

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;

- dal tempo di volo.

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione di pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) utilizzeremo un sistema di riferimento cartesiano XY in cui l'origine O degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

2.1 Calcolo della velocità periferica

Per il calcolo della gittata, elemento fondamentale è rappresentato dalla velocità angolare media ω 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 2π radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, ovvero la velocità angolare ω 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:

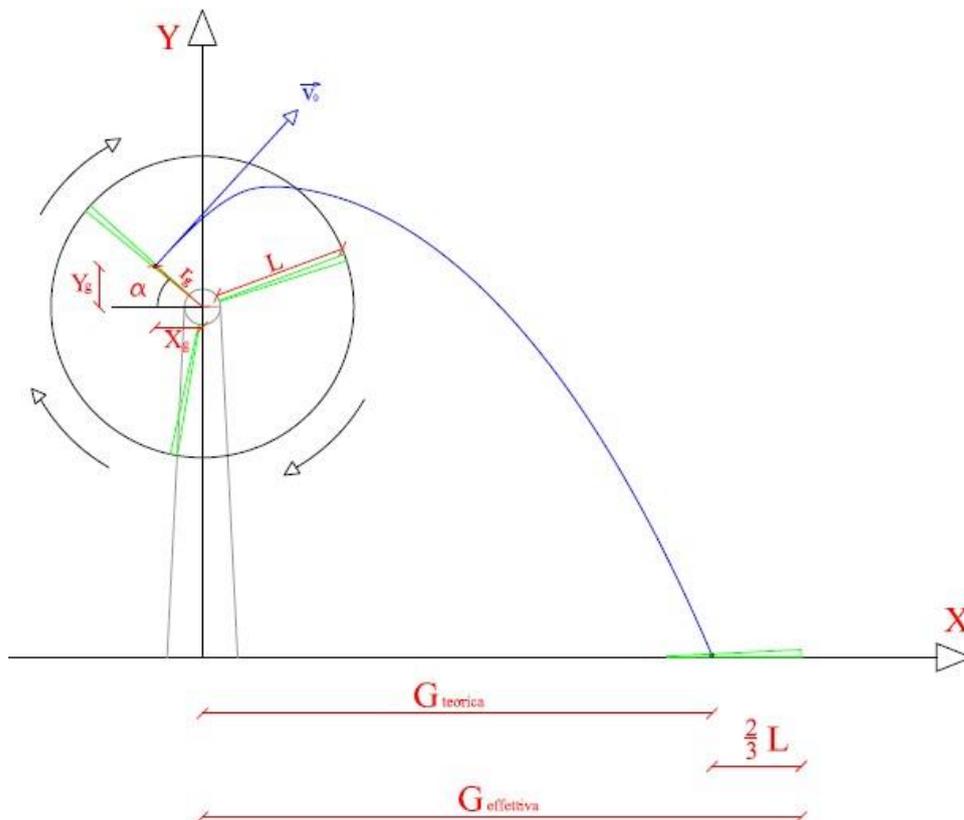
$$r_g = \frac{D}{2} - L + \frac{L}{3}$$

Con L pari alla lunghezza della pala; rg 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 $rg = 27$ 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 del proiettile

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.

Sceglieremo 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° 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 α 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:

$$x(t) = x_0 + v_x * t$$

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

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:

$$t = v_y/g + 1/g * \sqrt{(v_y^2 + 2y_0 * g)}$$

Dalla legge del moto si ottiene che:

$$G = x(t)$$

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

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

Dove

HG = Htorre + Yg (altezza di lancio)

con Yg = rg sen α

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

2.2 Calcolo della massima gittata

Nel calcolo della massima gittata sono state utilizzate le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;
- si ritengono trascurabili le forze di resistenza dell'aria;
- le componenti dell'accelerazione saranno $a_x = 0$, $a_y = -g$.
- la velocità periferica v_o è uguale a 31,40 m/sec.
- Le coordinate del punto di partenza del corpo non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma (0, HG = Htorre + Yg) ossia le coordinate del baricentro G di una pala.

Si è considerato il caso di rottura per distacco di un aerogeneratore dalle seguenti caratteristiche:

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

Nella tabella che segue si sono indicati i valori più rappresentativi della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta rispetto a valori di θ .

Angolo ϕ	vx0	vy0	Hg	Gittata Effettiva
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

Tabella 2 Calcoli gittata massima

Dall'analisi della gittata, si deduce che la massima distanza percorsa dall'elemento si ottiene per un angolo θ intorno a 67° con un valore di gittata pari a circa **262,23 metri**.

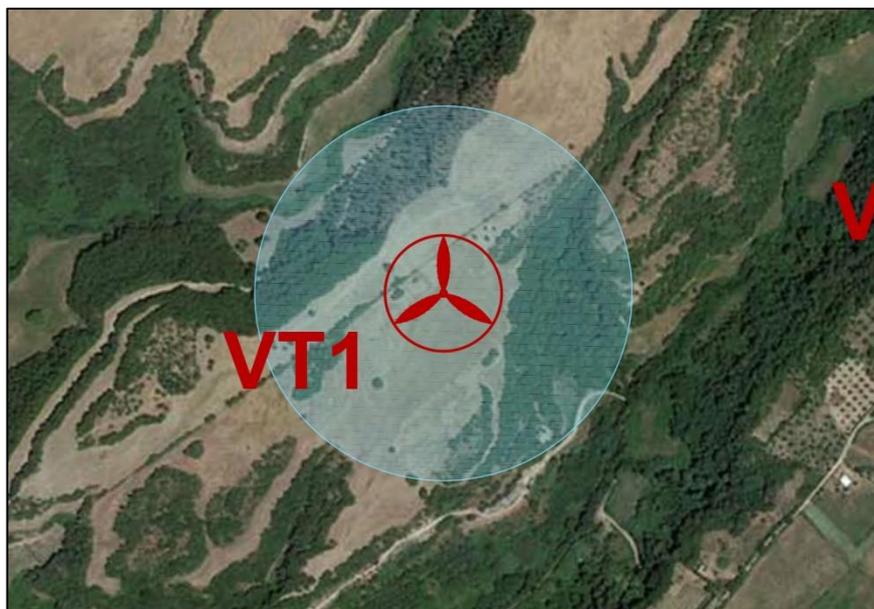


Figura 2 Massima area di caduta aerogeneratore VT1



Figura 3 Massima area di caduta aerogeneratore VT2



Figura 4 Massima area di caduta aerogeneratore VT3

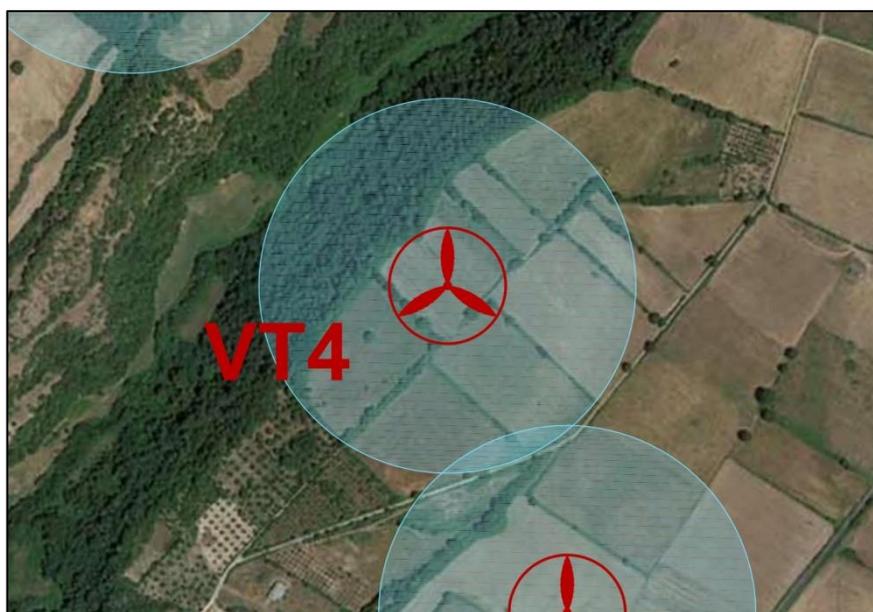


Figura 5 Massima area di caduta aerogeneratore VT4



Figura 6 Massima area di caduta aerogeneratore VT5



Figura 7 Massima area di caduta aerogeneratore VT6

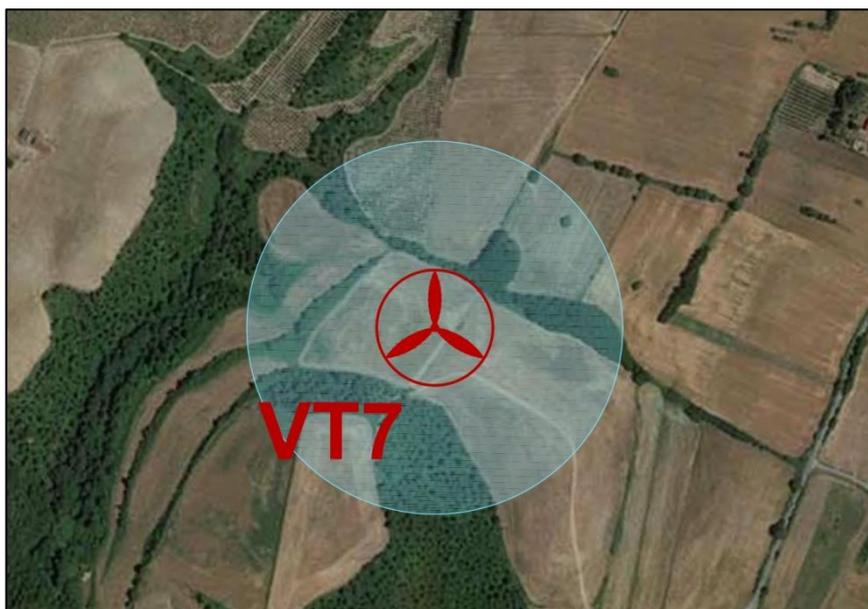


Figura 8 Massima area di caduta aerogeneratore VT7



Figura 9 Massima area di caduta aerogeneratore VT8



Figura 10 Massima area di caduta aerogeneratore VT9



Figura 11 Massima area di caduta aerogeneratore VT10

2.3 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.

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

- P_{so} è il valore di soglia relativo all'oggetto da difendere;
- P_1 è la probabilità di occasione dell'evento incidentale accaduto alla turbina eolica;
- P_2 è la probabilità di occasione dell'urto tra l'oggetto da proteggere e la pala;
- P_3 è la probabilità di occasione della condizione di vento sfavorevole o dei condizionamenti ambientali;
- P_4 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 Risk Involved 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 3 frequenza di accadimento rottura aerogeneratore

3. 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 metri**.

Si precisa che nessuna tipologia di edificio è posizionata ad una distanza inferiore 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, statale o comunque caratterizzata da un traffico elevato è posizionata ad una distanza inferiore a quella di massima gittata.

Dalle analisi effettuate si può assumere che il fenomeno di rottura degli organi rotanti di un aerogeneratore risulta altamente improbabile per il distacco intero della pala, e che per effetto della fulminazione atmosferica frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, sono stati ritrovati a non più di 40-50 m dalla base dell'aerogeneratore. Inoltre, secondo lo studio di DEWI OCC le percentuali dei guasti annuali stimate hanno un valore di 4.2×10^{-4} per la rottura delle pale e/o di parti di esse. Tali valori, per come sono stati ricavati, possono ritenersi oltre che molto bassi anche decisamente cautelativi; infatti, il parco turbine su cui sono state fatte le statistiche comprende anche installazioni molto datate (anche ante 1984). Oggi i metodi di progettazione e costruzione degli aerogeneratori sono decisamente migliorati e rispondono a riconosciuti

standard internazionali. Pertanto, la possibilità di rottura delle pale e/o delle parti delle pale è da ritenersi altamente improbabile, per cui i risultati a cui si è giunti sono altamente cautelativi.