

REGIONE CAMPANIA



COMUNE DI COLLE SANNITA

PROVINCIA DI BENEVENTO



OGGETTO: REALIZZAZIONE IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA, AI SENSI DEL D.LGS N. 387 DEL 2003, COMPOSTO DA N° 2 AEROGENERATORI, PER UNA POTENZA COMPLESSIVA DI 6 MW, SITO NEL COMUNE DI COLLE SANNITA (BN), IN LOCALITA' "MONTE FREDDO".

ELABORATO	DESCRIZIONE	SCALA DI RAPP.
Elab-6	ANALISI ROTTURA ELEMENTI ROTANTI	
data: 12/2016		Revisione n° 00

Progettazione:
Ing. Sandro Ruopolo

REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
Ing. Sandro Ruopolo	Ing. Giuseppe De Masi	Ing. Sandro Ruopolo
Ing. Giuseppe De Masi	Ing. Giuseppe Delli Priscoli	
Ing. Viviana Criscuolo		
Geom. Danilo Sgambati		



Sommario

1	Premessa	2
2	Equazioni del moto.....	3
2.1	Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica	4
3	Gittata massima.....	5
3.1	Calcolo della velocità periferica.....	7
3.2	Calcolo della gittata massima	8
4.	Conclusioni	12

1 Premessa

Un parametro di rischio da tenere in considerazione è rappresentato dalla rottura accidentale di parti di aerogeneratore durante il loro funzionamento. Le turbine, essendo elementi in movimento durante il loro funzionamento, possono subire una rottura accidentale con il rischio di ritrovamenti di pezzi di aerogeneratori ad una certa distanza dal punto di rottura per effetto del moto rotativo delle pale. Per questo motivo è importante calcolare la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale per la verifica dei requisiti di sicurezza.

Questo documento riporta lo studio realizzato per il calcolo della gittata massima della pala, con riferimento alla tecnologia utilizzata nel progetto del parco eolico previsto nel comune di Colle Sannita (BN).

Lo studio viene redatto applicando una metodologia di calcolo che abbia rigore scientifico e considerando tutti i possibili effetti meccanici ed aerodinamici che possono in qualche modo influenzare la distanza di gittata della pala.

Nel calcolo, si ipotizza per ragioni cautelative l'applicazione delle condizioni peggiori in cui si possa verificare il distacco della pala dell'aerogeneratore. In particolare, per causa delle caratteristiche costruttive degli aerogeneratori, la pala che accidentalmente si distacca dal rotore viene messa in moto dalla forza centrifuga determinata dalla rotazione del rotore stesso, con una velocità iniziale V_0 proporzionale alla velocità di rotazione del rotore.

Il modello di turbina in esame è Vestas V136 – 3 MW, avente il diametro del rotore pari a 136 mt altezza hub 142 mt.

2 Equazioni del moto

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. Per tale ragione si è considerato il caso di rottura per distacco di un aerogeneratore dalle seguenti caratteristiche:

Diametro Rotore [m]	136
Altezza del mozzo [m]	142
Inclinazione asse rotore [°]	4,0
Potenza nominale [MW]	3
Velocità rotore nominale[rpm]	12-13
Velocità di Cut-in [m/s]	3-5
Velocità di Cut-out [m/s]	22,5

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati (o urtano ad esempio) con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante e che compiono un moto parabolico. Chiaramente la resistenza dell'aria non è assolutamente trascurabile. Infatti, più il corpo è grande, più la resistenza dell'aria (o di un altro fluido) influisce sulle variabili del moto (gittata, altezza massima, tempo di caduta). Una caratteristica importante della resistenza aerodinamica dei fluidi è che essa dipende dalla velocità: più veloci sono gli oggetti, più grande è la resistenza dei fluidi nei quali si muovono.

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.

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. È interessante osservare che all'aumentare dell'angolo a formato con il terreno, la gittata del proiettile aumenta, presentando valore massimo per un angolo pari a $\pi/4$; ad ulteriori incrementi dell'angolo a il valore della gittata torna a diminuire presentando un valore nullo allorché il proiettile è lanciato verso l'alto con angolo pari a π .

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.

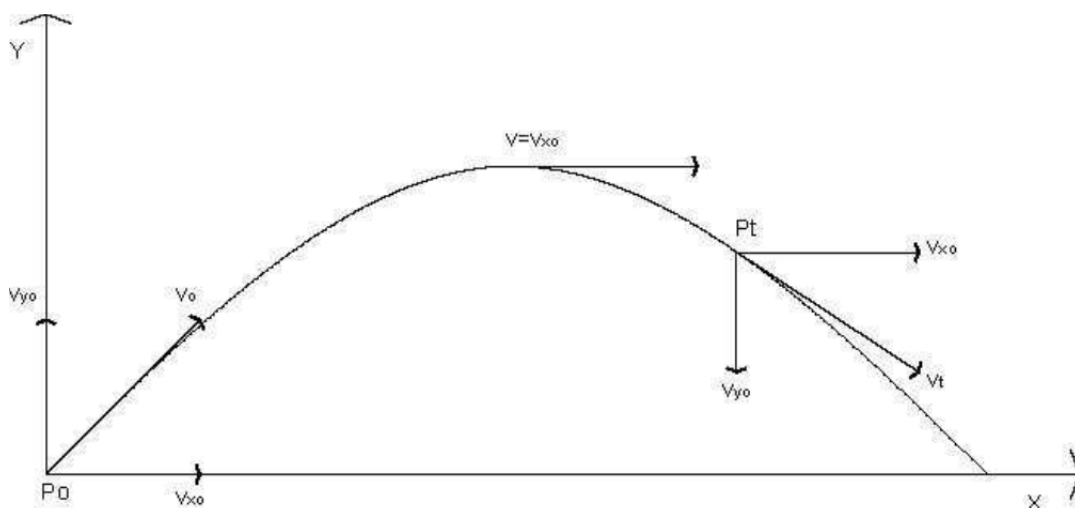
2.1 Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica

Considereremo inizialmente il moto bidimensionale di un proiettile, come il moto 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 con l'origine degli assi O centrata nel punto di partenza del corpo (x_0, y_0), con l'asse delle Y positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle X nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno:

$$a_x = 0 \quad a_y = -g$$

Rappresenteremo la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale v_0 e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di θ come in figura:



Ricordando che:

$$a_x = 0 \quad a_y = g \text{ (dove } g = -9,81 \text{ m/sec}^2\text{)}$$

e considerando che:

Direzione x: il MOTO è RETTILINEO UNIFORME

Direzione y: il MOTO è UNIFORMEMENTE ACCELERATO

La velocità v_0 ha componenti nelle due direzioni:

$$v_x = v_0 \cos \theta$$

$$v_y = v_0 \sin \theta$$

Da cui:

$$v_x = v_{x0}$$

$$x = x_0 + v_{x0}t$$

e

$$v_y = gt + v_{y0}$$

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

3 Gittata massima

La gittata è la distanza percorsa dal proiettile in direzione x prima di toccare terra.

Questo valore si trova imponendo che nella equazione:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

sia nullo y determinando così l'istante t in cui avviene il transito (e in questo caso l'impatto) alla quota $y = 0$ sarà:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 = 0$$

Nell'ipotesi semplificativa che $y_0 = 0$ si ottiene:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t = 0$$

da cui le due soluzioni:

$$t_0 = 0 \qquad t_1 = -\frac{2v_{y0}}{g} = -\frac{2v_0 \sin \theta}{g}$$

t_0 corrisponde all'istante di lancio del proiettile (abbiamo infatti ipotizzato per semplicità che $y_0 = 0$);

t_1 all'istante in cui il proiettile, avvenuto il lancio, tocca nuovamente terra. Sostituendo quest'ultimo valore nell'equazione $x = x_0 + v_{x0}t$, descrittiva del moto lungo x , si ricaverà il valore della gittata:

$$x = x_0 - 2 \frac{v_0^2}{g} \sin \theta \cos \theta$$

Ipotizzando per semplicità che

$$x_0 = 0$$

ed essendo

$$2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta$$

si può riscrivere la equazione per il calcolo della gittata come:

$$x = -\frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta$$

La gittata massima è così funzione del modulo della velocità iniziale, della ascissa e della quota iniziale di lancio (che in questo caso semplificato sono state considerate nulle), e di θ angolo di inclinazione della gittata: in particolare essa sarà massima quando $\sin 2\theta = 1$ cioè $2\theta = \pi/2$ ossia $\theta = \pi/4$.

Nel caso in questione y_0 non sarà uguale a zero, ma corrispondente alla quota del baricentro G del sistema ipotizzato rispetto alla quota del piano di campagna.

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, ossia $r_g = 22,66 \text{ m}$ a partire dal mozzo, essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a 68 m . Nel caso peggiore, quindi, l'oggetto che si distacca dalla pala avrà una lunghezza pari a 45.4 m e spessore variabile fino all'estremità della pala. L'assunzione parte da numerosi casi analizzati dalle case costruttrici. Infatti tali produttori dichiarano che il caso di Progetto del parco eolico nel comune di Colle Sannita (BN)

distacco di porzioni di pala si potrebbe trattare effettuando un'analisi del rischio che è dato dal prodotto fra la probabilità di occorrenza della specifica rottura e la gravità delle conseguenze. Una simile analisi comporterebbe comunque delle assunzioni al contorno arbitrarie fra le quali le dimensioni del pezzo di pala interessato al distacco e uno studio probabilistico sull'occorrenza e la gravità delle conseguenze.

Per effettuare queste valutazioni è necessario uno studio aerodinamico associato ad un'analisi statistica degli eventi incidentali dovrebbe essere notevolmente ampia, la qual cosa non è verificata nella realtà.

Di conseguenza l'altezza di lancio sarà uguale a:

$$y_0 = H_{torre} + Y_g$$

Dove

$$Y_g = \frac{1}{3} r_g \cdot \sin \theta$$

Ciò implica che la soluzione di t sarà:

$$t = \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4\left(\frac{1}{2} g y_0\right)}}{g}$$

tale valore andrà sostituito nell'equazione descrittiva del moto lungo x , per trovare la gittata massima.

3.1 Calcolo della velocità periferica

La velocità angolare media ω è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo.

Chiamiamo con 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, che è appunto la velocità angolare ω al minuto del corpo in movimento.

Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

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

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio r percorre la circonferenza $2\pi r$; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà $2\pi r n$ metri/minuto. E questo sarà lo spazio percorso da tutti i punti situati sulla periferia del corpo in movimento circolare.

Dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante (considerando la velocità massima del rotore di 12,8 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g = 25 \text{ m/sec}$$

3.2 Calcolo della gittata massima

Nell'ipotesi di distacco, vengono considerate 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_0 è uguale a 25 m/sec.
- Le coordinate del punto di partenza del corpo, non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma (0, $HG = H_{torre} + Y_g$) ossia le coordinate del baricentro G di una pala.

La risoluzione dell'equazione descrittiva del moto, nelle suddette condizioni, sarà quindi:

$$Gittata \ max = v_{x0} \cdot \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}gH_G\right)}}{2g}$$

La valutazione della gittata con la formula matematica su esposta dovrà tenere conto necessariamente di numerosi fattori di attenuamento durante il volo dell'oggetto. Infatti il corpo in movimento avrà una determinata massa e un certo volume che darà origine, a contatto con l'aria, ad una componente di attrito. Inoltre la densità dell'aria all'aumentare della quota varia in funzione del parametro della temperatura. Considerando una diminuzione di temperatura con l'aumentare della quota, la densità dell'aria aumenterà, e questo comporta necessariamente un attenuamento del moto

del corpo. Infine, e non da ultimo, il peso proprio del corpo in movimento genera una componente vettoriale verso il basso attirandolo verso il suolo.

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 .

θ (°)	θ (rad)	Vx	Vy	Hg	Gittata effettiva
0	0,00	25,00	0,00	142,00	65,26
1	0,02	25,00	0,44	142,13	65,84
2	0,03	24,98	0,87	142,26	66,40
3	0,05	24,97	1,31	142,39	66,94
4	0,07	24,94	1,74	142,53	67,47
5	0,09	24,90	2,18	142,66	67,98
6	0,10	24,86	2,61	142,79	68,47
7	0,12	24,81	3,05	142,92	68,93
8	0,14	24,76	3,48	143,05	69,38
9	0,16	24,69	3,91	143,18	69,81
10	0,17	24,62	4,34	143,31	70,21
11	0,19	24,54	4,77	143,44	70,59
12	0,21	24,45	5,20	143,57	70,94
13	0,23	24,36	5,62	143,69	71,27
14	0,24	24,26	6,05	143,82	71,58
15	0,26	24,15	6,47	143,95	71,86
16	0,28	24,03	6,89	144,08	72,11
17	0,30	23,91	7,31	144,20	72,33
18	0,31	23,78	7,73	144,33	72,53
19	0,33	23,64	8,14	144,45	72,69
20	0,35	23,49	8,55	144,58	72,83
21	0,37	23,34	8,96	144,70	72,93
22	0,38	23,18	9,37	144,82	73,00
23	0,40	23,01	9,77	144,94	73,05
24	0,42	22,84	10,17	145,06	73,06
25	0,44	22,66	10,57	145,18	73,03
26	0,45	22,47	10,96	145,30	72,97
27	0,47	22,28	11,35	145,42	72,88
28	0,49	22,07	11,74	145,54	72,76
29	0,51	21,87	12,12	145,65	72,60
30	0,52	21,65	12,50	145,77	72,40

31	0,54	21,43	12,88	145,88	72,16
32	0,56	21,20	13,25	145,99	71,89
33	0,58	20,97	13,62	146,10	71,59
34	0,59	20,73	13,98	146,21	71,24
35	0,61	20,48	14,34	146,32	70,86
36	0,63	20,23	14,69	146,43	70,44
37	0,65	19,97	15,05	146,53	69,98
38	0,66	19,70	15,39	146,64	69,49
39	0,68	19,43	15,73	146,74	68,95
40	0,70	19,15	16,07	146,84	68,38
41	0,72	18,87	16,40	146,94	67,76
42	0,73	18,58	16,73	147,04	67,11
43	0,75	18,28	17,05	147,14	66,42
44	0,77	17,98	17,37	147,23	65,69
45	0,79	17,68	17,68	147,33	64,92
46	0,80	17,37	17,98	147,42	64,11
47	0,82	17,05	18,28	147,51	63,27
48	0,84	16,73	18,58	147,60	62,38
49	0,86	16,40	18,87	147,69	61,46
50	0,87	16,07	19,15	147,77	60,49
51	0,89	15,73	19,43	147,85	59,49
52	0,91	15,39	19,70	147,94	58,46
53	0,93	15,05	19,97	148,02	57,38
54	0,94	14,69	20,23	148,09	56,27
55	0,96	14,34	20,48	148,17	55,12
56	0,98	13,98	20,73	148,25	53,94
57	0,99	13,62	20,97	148,32	52,72
58	1,01	13,25	21,20	148,39	51,46
59	1,03	12,88	21,43	148,46	50,17
60	1,05	12,50	21,65	148,52	48,85
61	1,06	12,12	21,87	148,59	47,49
62	1,08	11,74	22,07	148,65	46,11
63	1,10	11,35	22,28	148,71	44,69
64	1,12	10,96	22,47	148,77	43,24
65	1,13	10,57	22,66	148,83	41,75
66	1,15	10,17	22,84	148,88	40,25
67	1,17	9,77	23,01	148,93	38,71
68	1,19	9,37	23,18	148,98	37,14
69	1,20	8,96	23,34	149,03	35,55
70	1,22	8,55	23,49	149,08	33,94
71	1,24	8,14	23,64	149,12	32,29

72	1,26	7,73	23,78	149,16	30,63
73	1,27	7,31	23,91	149,20	28,94
74	1,29	6,89	24,03	149,24	27,24
75	1,31	6,47	24,15	149,28	25,51
76	1,33	6,05	24,26	149,31	23,76
77	1,34	5,62	24,36	149,34	22,00
78	1,36	5,20	24,45	149,37	20,22
79	1,38	4,77	24,54	149,39	18,42
80	1,40	4,34	24,62	149,42	16,61
81	1,41	3,91	24,69	149,44	14,78
82	1,43	3,48	24,76	149,46	12,95
83	1,45	3,05	24,81	149,48	11,10
84	1,47	2,61	24,86	149,49	9,25
85	1,48	2,18	24,90	149,50	7,39
86	1,50	1,74	24,94	149,51	5,52
87	1,52	1,31	24,97	149,52	3,64
88	1,54	0,87	24,98	149,53	1,76
89	1,55	0,44	25,00	149,53	0,00
90	1,57	0,00	25,00	149,53	0,00

Dall'analisi della gittata si ottiene che la massima distanza percorsa dall'elemento si ottiene per un angolo θ intorno a 23° con un valore di gittata pari a circa **73 metri**.

Riportando uno studio della BP POWER nel "Blade throw calculation under normal operating" "esperienze basate su dati reali (su una casistica di 1578 casi) fino all'agosto del 2006 hanno dimostrato che nel caso di distacco della pala o parti di essa l'unico moto che si è registrato è stato un moto di completa rotazione e che le distanze percorse lungo il moto sono risultate sempre inferiori alle lunghezze riportate nella relazione. Il distacco delle parti, in genere piccole, dovuto a guasti causati da eventi eccezionali (quali la straordinaria energia prodotta da un fulmine) ha portato nel peggiore dei casi, a ritrovare le parti stesse a distanze non superiori ai 30-40 metri dalla base della torre."

Infine Il calcolo di gittata nei casi di distacco di frammenti o porzioni di guscio, per le ragioni spiegate in precedenza, risulta problematico e privo di basi computazionali, in quanto lo stabilire le dimensioni del pezzo di guscio distaccato è del tutto aleatorio e non dipendente da una causa

specificata come quelle collegabili ad una discontinuità, un difetto di progettazione o di realizzazione della pala.

4. Conclusioni

La distanza massima raggiunta da un elemento della pala che si rompe a seguito di un evento eccezionale è di 73 mt.

Lo studio del layout di progetto, ossia la ubicazione degli aerogeneratori sul territorio, oltre che a seguire precise regole tecniche al fine di ottenere la massima producibilità, è stato redatto rispettando tutti i vincoli ambientali e territoriali presenti sul territorio.

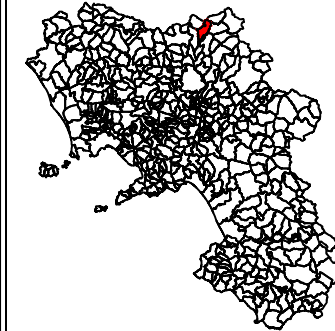
Pertanto **nessuna civile abitazione è posizionata ad una distanza minore od uguale a 73 mt** dalle turbine di progetto, per cui risulta verificata la sicurezza nel caso di rottura degli elementi rotanti.

UBICAZIONE DEI RICETTORI IN RELAZIONE ALLA GITTATA MASSIMA IN CASO DI ROTTURA

ALLEGATO 1

Inquadramento territoriale

Comune di Colle Sannita (Bn)



LEGENDA

	Piazzola aerogeneratore di progetto
	Ubicazione torre eolica
	Indicazione ricettore sensibile
	Limite di gittata massima degli elementi rotanti R=73 mt

CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

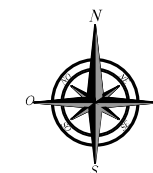
Nella relazione "Calcolo della gittata massima degli elementi rotanti" è stato effettuato il calcolo analitico della gittata. Tenuto conto della geometria dell'aerogeneratore, la gittata massima ha una estensione di 73 mt (si rinvia alla relazione tecnica per le valutazioni più specifiche). Pertanto è stato possibile individuare un areale all'interno del quale risulta probabile l'eventuale ritrovamento di parti della turbina. Detto areale è definito da una circonferenza con centro sull'aerogeneratore e raggio R=73 mt.

ANALISI RICETTORI

L'analisi è stata condotta valutando tutti i ricettori presenti nell'area d'intervento e nello specifico sono state rilevate la presenza di abitazioni, viabilità principali, luoghi di aggregazione. Come si evince dalla cartografia non sono presenti ricettori nell'areale di sviluppo della gittata massima.

CONCLUSIONI

Alla luce delle considerazioni su esposte è possibile asserire che il posizionamento degli aerogeneratori, sia tale da garantire la sicurezza nel caso di rottura accidentale degli elementi rotanti



SCALA
1:5000

