

Parco eolico “SCOLPITO”
Comune di Comune di Brindisi (BR)

ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA
DEGLI ORGANI ROTANTI

Ing. Alberto Voltolina

INDICE

1	PREMESSA	3
2	VERIFICHE E VALUTAZIONI	4
3	AEROGENERATORI DI PROGETTO	4
4	LAYOUT DI PROGETTO	6
5	CALCOLO GITTATA	6
	5.1 Ipotesi di Calcolo	6
	5.2 Formulazione Analitica	8
	5.3 Calcolo della Gittata	10
6	VALUTAZIONE DEI RECETTORI SECONDO IL D.M. 10-9-2010	12
	6.1 Edifici	13
	6.2 Strade Nazionali e Provinciale	14
7	CONCLUSIONI	15

1 PREMESSA

In riferimento al D.M. 10-9-2010 "*Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili*", l'allegato 4, punto 7.1 "*Analisi dei possibili incidenti*" riporta testualmente: "*E' opportuno prendere in esame l'idoneità delle caratteristiche delle macchine, in relazione alle condizioni meteorologiche estreme del sito. In tal senso: [...]*"

- *andrebbe valutata la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentate*".

La presente relazione, dunque, in ottemperanza al D.M. su citato riguarda il calcolo della gittata in caso di rottura di un frammento degli elementi rotanti nell'ipotesi che la rottura avvenga in modo fragile e che i sistemi di controllo quali freno aerodinamico e sistema parafulmine siano completamente fuori servizio.

Il frammento considerato riguarda un pezzo della pala con rottura a 5 m dalla punta stessa, condizione di calcolo che produce la massima gittata nell'ipotesi cautelativa di previsione, ma anche di bassissima probabilità di accadimento stante la tipologia costruttiva degli attuali aerogeneratori.

Per la quantificazione della gittata massima si utilizzerà il modello della "rotazione complessa del corpo rigido" basandosi sulle seguenti ipotesi:

1. Il distacco del frammento, e quindi la gittata, è funzione dell'angolo di distacco che l'asse della pala forma con l'orizzontale;
2. Si ipotizza che la sezione di distacco della pala dal resto della struttura sia netta, ovvero che la rottura avvenga in modo fragile senza considerare l'effettiva struttura fibrosa e filamentosa del corpo della pala, immersa in una matrice di resina epossidica.

Il calcolo che segue è stato condotto in maniera approfondita, considerando i diversi aspetti fisici ed è stato svolto con rigore, tuttavia nella realtà il verificarsi delle cause che portano ad una rottura di un frammento di pala e del conseguenziale urto sono molto improbabili.

2 VERIFICHE E VALUTAZIONI

Oggetto del presente studio sono la verifica delle distanze del D.M. 10-9-2010 rispetto alle strade statali e provinciali e le valutazioni del rischio della gittata massima rispetto a ricettori, si elencano nell'ordine:

- A. la verifica del rispetto del D.M. 10-9-2010 che con l'allegato 4, punto 7.2 impone:
"la distanza di ogni turbina eolica da una strada provinciale o nazionale deve essere superiore all'altezza massima dell'elica comprensiva del rotore e comunque non inferiore a 150 m dalla base della torre";
- B. la valutazione della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto ai recettori;
- C. la valutazione della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto alle strade nazionale e provinciali;

3 AEROGENERATORI DI PROGETTO

Nello specifico, il parco eolico denominato "Scolpito", situato nel comune di Brindisi (BR), sarà costituito da **5 aerogeneratori**, ciascuno dei quali sviluppa una potenza nominale pari a 6 MW, per una **Potenza Complessiva** del Parco Eolico di **30 MW**. Gli aerogeneratori saranno della tipologia GE 158-6.0 e verranno installati su torri tubolari di altezza pari a 120,9m, ed il rotore avrà un diametro di 158m, pertanto l'altezza massima raggiungibile dalla punta della pala è pari a 199,9 m.

4 LAYOUT DI PROGETTO

L'area prevista per l'installazione dell'impianto eolico è ubicata interamente nel territorio del comune di Brindisi (BR) a sud ovest della frazione di Tutturano. L'area è prettamente ad uso agricolo con presenza quasi nulla di ricettori ed edifici, infatti l'aerogeneratore più vicino alla frazione di Tutturano (n. 4) si trova a circa 4 km.

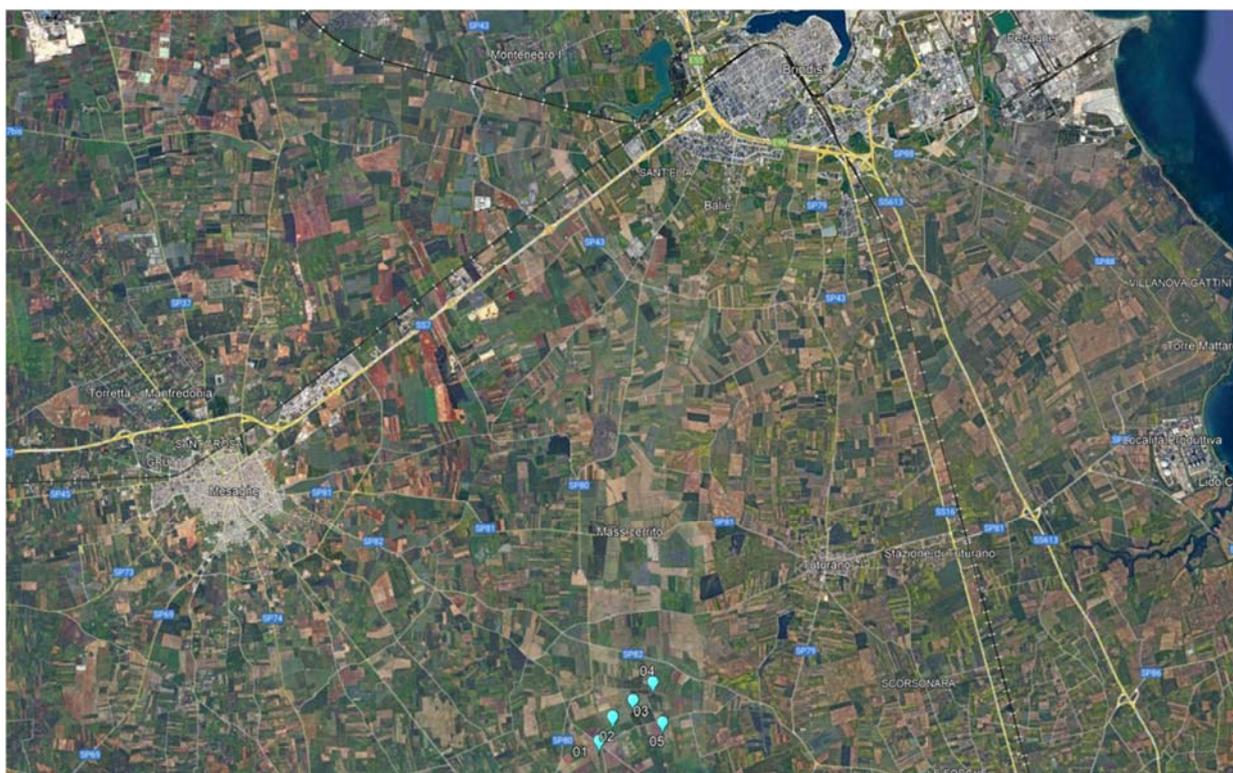


Figura 2 - Inquadramento del progetto

5 CALCOLO GITTATA

5.1 Ipotesi di Calcolo

Si calcola ora la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale del frammento di pala, considerando tale frammento il pezzo estremo con rottura a 5 metri.

Lo studio che segue considera il seguente aerogeneratore:

Modello	Potenza [MW]	Altezza mozzo [m]	Diametro rotore [m]	Velocità massima alla punta della pala [m/s]	Altezza massima complessiva [m]
G.E. 158 -6.0	6	120,9	158	82	199,9

La velocità massima tangenziale (V) alla punta della pala può essere semplicemente tradotta in velocità angolare (rpm) secondo la seguente equazione

$$\omega = \frac{60 \cdot V}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Dove con r si intende metà del diametro del rotore e da cui risulta pertanto che ω è pari a 9,91 rpm.

3 Technical Data for the Cypress-158

Turbine	4.2/4.5/4.8/5.0/5.2/5.3/5.5/5.8/6.1 158
Rated output [MW]	4.2/4.5/4.8/5.0/5.2/5.3/5.5/5.8/6.1
Rotor diameter [m]	158
Number of blades	3
Swept area [m ²]	19607
Rotational direction (viewed from an upwind location)	Clockwise
Maximum speed of the blade tips [m/s]	4.2-4.8MW 50Hz - 74.5 m/s 5.0-5.5MW 50Hz - 80.3 m/s 4.8-6.1MW 50Hz - 82.0 m/s 4.8-6.1MW 60Hz - 83.6 m/s
Orientation	Upwind
Speed regulation	Pitch control
Aerodynamic brake	Full feathering
Color of outer components	RAL 7035 (light grey) and RAL 7023 (concrete grey, for concrete sections of hybrid tower only)
Reflection degree/Gloss degree Steel tower	30 - 60 gloss units measured at 60° as per ISO 2813
Reflection degree/Gloss degree Rotor blades, Nacelle, Hub	60 - 80 gloss units measured at 60° as per ISO 2813
Reflection degree/Gloss degree Hybrid Tower	Concrete gray (similar RAL 7023); gloss matte

Table 1: Technical data Cypress-158 wind turbine

Figura 3 - Documento originale GE 158 con evidenza della velocità massima alla punta della pala

5.2 Formulazione Analitica

Si definiscono le equazioni del moto per il punto materiale, soggetto a forze inerziali gravitazionali:

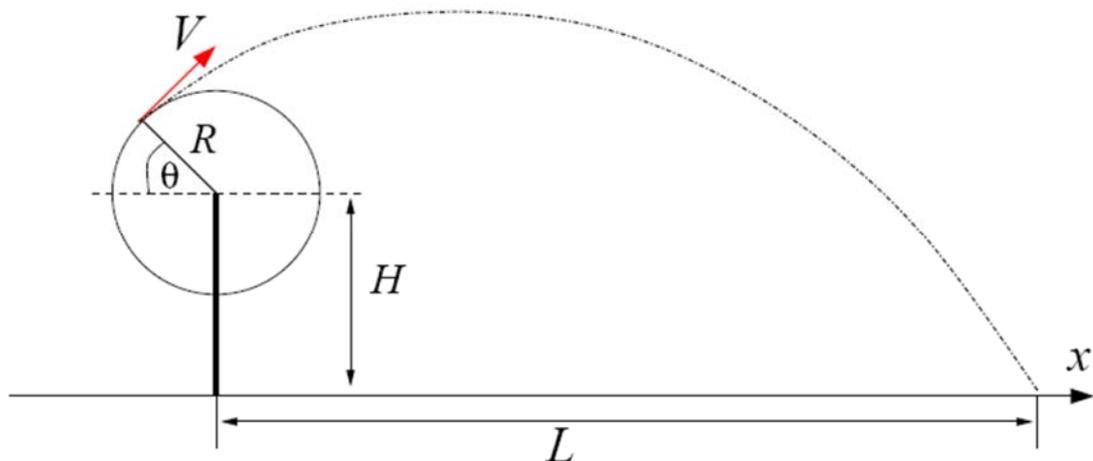
$$\begin{cases} x'' = 0 \\ y'' = -g \end{cases} \left(g = 9.81 \frac{m}{s^2} \right)$$

Sviluppando la legge del moto dei proiettili si ottiene la seguente forma:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_x \cdot t \\ y(t) = y_0 + v_y \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases}$$

Dove il vettore $(x_0 ; y_0)$ identifica la posizione iniziale del punto materiale, mentre il vettore $(v_x ; v_y)$, la sua velocità in funzione del tempo. Il punto materiale analizzato, nella sua traiettoria, intercetta il suolo ad un tempo t , tale per cui $y(t) = 0$. Con tale condizione al contorno è possibile, sviluppando il sistema, ottenere la seguente espressione:

$$t = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0g}$$



Utilizzando come condizioni al contorno, l'angolo θ (rispetto all'orizzontale) al momento del distacco e la sua velocità iniziale V , si perviene al seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} x_0 = -R \cdot \cos(\theta) \\ y_0 = H + R \cdot \sin(\theta) \\ v_x = V \cdot \sin(\theta) \\ v_y = V \cdot \cos(\theta) \end{cases}$$

Dove R è pari alla distanza tra l'asse del mozzo e il baricentro del frammento di pala che si stacca (identificato con un punto materiale).

Pertanto andando ad analizzare il distacco di un frammento di 5 m, il baricentro dello stesso sarà ad 1/3 della sua lunghezza e quindi la distanza tra il centro del mozzo ed il baricentro del frammento di 5 m (C) sarà pari a 75,67 m, derivante dal calcolo seguente:

$$R = (D/2) - (C * 2/3)$$

Dove D è il diametro del rotore.

La distanza di impatto al suolo si verifica alla distanza orizzontale L (dall'asse del mozzo), secondo:

$$L = x(t)$$

Sostituendo l'espressione di t, già ricavata prima; e sviluppando l'equazione, si ricava la distanza L, in funzione dei due parametri V e θ , mentre H è l'altezza del mozzo:

$$L = \frac{V \cdot \sin(\theta)}{g} \cdot \left\{ V \cdot \cos(\theta) + \sqrt{V^2 \cos^2(\theta) + 2[H + R \cdot \sin(\theta)]g} \right\} - R \cdot \cos(\theta)$$

In questo caso V è pari alla velocità iniziale al momento del distacco ridotta del 30% percentuale che vuole tener conto delle resistenze esterne. Pertanto se la velocità iniziale pura sarebbe pari a:

$$V_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot rpm}{60} = 78,54 \text{ m/s}$$

la velocità ridotta del 30 % è pari a:

$$V = V_i - 0,3 \times V_i = 54,98 \text{ m/s}$$

Si sono analizzati varie configurazioni di angolo di distacco (37 configurazioni, a step di 5° da 0° a 180°).

Si noti che, fissato un generico angolo θ , la gittata aumenta quadraticamente con V, salvo i casi particolari $\theta = 90^\circ, 0^\circ, 180^\circ$, nei quali la gittata aumenta linearmente con V, oppure è pari ad R.

La formula sopra indicata è funzione dell'angolo di distacco al momento della rottura.

Nella ipotesi che la rottura avvenga nel punto più alto ($\theta = 90^\circ$ nei grafici) il frammento si distaccherebbe con velocità parallela al suolo. Questo non è il caso della

massima gittata, come si evince dalla formula, ma anche dall'analogia con elementari problemi di balistica. Nel caso di un cannone che spara in pianura, la massima gittata si ha per $\theta = 45^\circ$ e non quando il proiettile parte parallelamente al suolo. Nel caso di una torre eolica la determinazione dell'angolo di massima gittata è leggermente più complesso, ma non è mai pari a 90° . La sua determinazione impone di trovare il massimo della funzione al variare dell'angolo θ .

In ogni caso tale relazione è puramente teorica, poiché non tiene conto:

1. della riduzione di velocità del pezzo in volo per l'attrito con l'aria;
2. della rotazione in volo del pezzo che si distacca;
3. del vento che sposterà il pezzo secondo la sua direzione al quanto variabile spazialmente e sostanzialmente introducendo una ulteriore forza Z_0 perpendicolare al piano di rotazione delle pale;
4. delle forze che si generano al momento della rottura poiché considera una rottura istantanea;
5. della morfologia del territorio.

L'unico parametro che vuole considerare tutti questi aspetti è il coefficiente di riduzione della velocità iniziale al momento del distacco che è assunto pari a 0,3%.

5.3 Calcolo della Gittata

Alla luce di quanto fin qui descritto risulta facilmente calcolabile la gittata massima di un frammento di 5 m della punta dell'aerogeneratore GE 158-6.0:

Angolo θ [°]	L [m]- Gittata in funzione di θ	U.M.
0,00	-75,67	m
5,00	-12,38	m
10,00	50,79	m
15,00	112,32	m
20,00	170,79	m
25,00	224,90	m
30,00	273,56	m
35,00	315,86	m
40,00	351,15	m
45,00	379,02	m
50,00	399,35	m
55,00	412,27	m
60,00	418,15	m
65,00	417,57	m
70,00	411,32	m
75,00	400,28	m
80,00	385,43	m
85,00	367,73	m
90,00	348,11	m
95,00	327,39	m
100,00	306,28	m
105,00	285,33	m
110,00	264,95	m
115,00	245,40	m
120,00	226,87	m
125,00	209,42	m
130,00	193,07	m
135,00	177,79	m
140,00	163,52	m
145,00	150,17	m
150,00	137,68	m
155,00	125,93	m
160,00	114,86	m
165,00	104,38	m
170,00	94,40	m
175,00	84,86	m
180,00	75,67	m

Dalla precedente tabella si evince che la massima distanza di gittata prevista, per un frammento di punta di pala pari a 5 m, sia pari a **418,15 m** con un angolo di distacco pari a 60°. Tutto ciò avviene considerando che la macchina è libera di ruotare senza il controllo del sistema frenante.

Tale assunzione è assolutamente cautelativa e a favore di sicurezza e allo stesso tempo molto difficile dal realizzarsi.

6 VALUTAZIONE DEI RECETTORI SECONDO IL D.M. 10-9-2010

Alla luce dei risultati sopra riportati risulta facile individuare potenziali ricettori ricadenti all'interno di un'area circolare attorno agli aerogeneratori con raggio pari a 418,15 m.

Dalla figura seguente si evince che all'interno delle "aree di gittata" sono presenti solamente 3 edifici che potrebbero potenzialmente essere ritenuti frequentati da persone. Come si vedrà di seguito sono totalmente in uno stato di abbandono o si tratta di cabine di impianto.



Figura 4 - Inquadramento con Aree di gittata

6.1 Edifici

Edificio 1		Documentazione fotografica 
Regione	PUGLIA	
Provincia	BRINDISI	
Comune	BRINDISI	
Tipologia rilevata	RUDERE	
Cat. Catastale	FABB DIRUTO	
Foglio	181	
Particella	446	
WTG coinvolte	WTG 02 E WTG 03	
Note descrittive: Il fabbricato non è più identificato nel catasto "immobili" in quanto presenta crolli delle strutture verticali e/o orizzontali, il cui recupero prevede la demolizione totale.		

Edificio 2		Documentazione fotografica 
Regione	PUGLIA	
Provincia	BRINDISI	
Comune	BRINDISI	
Tipologia rilevata	RUDERE	
Cat. Catastale	F02	
Foglio	179	
Particella	315	
WTG coinvolta	WTG 03	
Note descrittive: Unità collabente, ossia fabbricato totalmente o parzialmente inagibile, caratterizzato da un notevole livello di degrado che ne determina l'incapacità di produrre ordinariamente un reddito proprio.		

Edificio 3		
Regione	PUGLIA	Documentazione fotografica 
Provincia	BRINDISI	
Comune	BRINDISI	
Tipologia rilevata	RUDERE	
Cat. Catastale	OPIFICIO	
Foglio	181	
Particella	461	
WTG coinvolta	WTG 05	
Note descrittive: Opificio (0104), immobili in uso a centrali fotovoltaiche (cabina impianto FV)		

6.2 Strade Nazionali e Provinciale

Secondo l'articolo 7.2 dell'allegato 4 del D.M. 10-9-2010, citato al paragrafo 2 della presente relazione, la distanza di ogni turbina deve essere superiore all'altezza massima complessiva dell'aerogeneratore (in questo caso 199,9 m) e comunque non inferiore a 150 m.

Analizzando la figura 3, si vede chiaramente che le uniche due strade provinciali presenti nell'area sono la SP80 e la SP82. Si trovano però ad una distanza ben superiore dei 199,9 m massimi consentiti visto che sono posizionate oltre le "aree di gittata" che hanno un raggio di 418,15 m.

Nello specifico l'aerogeneratore più vicino alla SP 80 è il n. 1 e si trova 720 m, mentre il più vicino alla SP 82 è il n. 4 posizionato circa a 720 m dalla stessa.

7 CONCLUSIONI

Nonostante le ipotesi di situazione maggiormente gravosa prevedibile (assenza di organi frenanti, assenza di riduzione per attrito con l'aria; assenza di rotazione in volo del pezzo che si distacca; assenza di vento che possa spostare il pezzo secondo la sua direzione al quanto variabile spazialmente e sostanzialmente introducendo una ulteriore forza Z_0 perpendicolare al piano di rotazione delle pale; considerazione di una rottura istantanea) tutte inserite all'interno di un coefficiente riduttivo del 30% della velocità iniziale di distacco, ne discende che gli aerogeneratori non destano il ben che minimo rischio relativo a possibili incidenti per distacco di pala o frammenti di essa.