



## PROGETTO DI REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO

Località "Valle Castagna, Valle Cornuta, Mezzana del Cantone"  
Comune di Montemilone (PZ)



### A.7 RELAZIONE SPECIALISTICA-ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

Cliente/Customer			Commessa/Job	Emesso da	
<b><u>MILONIA S.R.L.</u></b>			98102	PER	
04	05/04/2017	REVISIONE	Scafidi	Scafidi	Ing. A. Sammartano
03	05/12/2016	ESECUTIVO	Scafidi	Scafidi	Ing. A. Sammartano
02	16/10/2014	REVISIONE	Ing. Silvia Casareale	Ing. S. Casareale	Ing. A. Sammartano
00	07/01/2010	EMISSIONE	Ing. Silvia Casareale	Ing. G. Garruti	Ing. V. Mastrangelo
<b>Rev</b>	<b>Data</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Preparato</b>	<b>Verificato</b>	<b>Approvato</b>
			<b>Autorizzazione Emissione</b>		

# Sommario

1. PREMESSA.....	3
2. ANALISI DEGLI EFFETTI DI ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI.....	3



# 1. PREMESSA

In letteratura sono annoverati pochissimi casi di danni causati dalle pale delle turbine in caso di rottura accidentale. Si tratta, infatti, di una circostanza eccezionale e i rischi connessi, soprattutto per la salute pubblica, sono estremamente bassi. Sono infatti davvero remote le possibilità che una pala di un aerogeneratore possa, attraverso la sua rottura, causare danni.

Inoltre la distanza minima da rispettare tra le turbine eoliche e i manufatti abitati o la viabilità principale imposta dalla normativa vigente è sempre maggiore della distanza necessaria ad assicurare la salute pubblica.

In generale questa distanza varia in funzione della grandezza della macchina, della forma, del peso della velocità del rotore, dell'altezza della turbina, ma comunque non supera mai i 300 metri (*WindFarm Safety in Australia, May 2004*); il distacco o la rottura della pala stessa sono eventi che si verificano per condizioni operative al di fuori del normale range di funzionamento delle macchine.

## 2. ANALISI DEGLI EFFETTI DI ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

Gli aerogeneratori che si utilizzeranno sono provvisti di sistemi di sicurezza che intervengono quando le condizioni di funzionamento sono tali da compromettere la funzionalità della macchina e la sicurezza pubblica. Gli aerogeneratori che si prevedono di installare hanno una potenza nominale massima di 3,63 MW, con altezza al mozzo massima di 132 m e rotore di diametro massimo pari a 142 m ed una velocità di rotazione massima a regime approssimativamente di 16.5 rpm e velocità in cut-out 25,00 m/sec.

Lo studio della gittata di un elemento rotante dell'aerogeneratore si basa sull'ipotesi di considerare l'elemento come un corpo rigido ovvero un insieme di particelle soggette a forze tali da mantenere costanti nel tempo le loro distanze relative. Pertanto, il moto di un corpo rigido è traslatorio quando tutte le particelle che costituiscono il corpo subiscono lo stesso spostamento qualsiasi sia l'intervallo di tempo considerato. In un moto traslatorio, rettilineo o curvilineo, ogni segmento che congiunge due punti qualunque del corpo rigido, durante il movimento, resta parallelo a se stesso, quindi tutti i punti descrivono traiettorie uguali e sovrapponibili. Il moto traslatorio di un corpo rigido resta dunque conosciuto quando è noto il moto di uno qualunque dei suoi punti.

Nella cinematica del moto rotatorio, considerando un corpo rigido incernierato ad un asse di rotazione fisso, un qualsiasi punto del corpo fuori dell'asse di rotazione può muoversi solo nel

piano perpendicolare all'asse, mantenendosi a distanza costante da questo, quindi il moto di un corpo rigido è rotatorio attorno ad un asse fisso se ogni particella del corpo si muove lungo una circonferenza e i centri di tutte le circonferenze si trovano su una retta chiamata asse di rotazione.

Tutti i punti del corpo rigido in rotazione si muovono con la stessa velocità angolare, pertanto si considera come centro di applicazione della velocità il baricentro del corpo, che si considera posizionato al centro della stessa.

Nel nostro studio si considera il moto del corpo bidimensionale, traslatorio e curvilineo, rappresentato da un punto materiale (baricentro) lanciato in aria obliquamente sottoposto all'accelerazione di gravità costante  $g$  diretta verso il basso ed ad velocità iniziale data dalla rotazione delle pale.

Lo studio della gittata massima degli elementi rotanti viene effettuato ipotizzando una condizione conservativa del moto in cui vengono trascurate le forze di resistenza che agiscono sulla pala.

Semplificare la trattazione del moto significa effettuare lo studio nelle condizioni peggiorative, poiché in assenza di forze viscosse la condizione sopra definita è quella che dà la massima gittata. Ciò è vero finché si trascura la resistenza esercitata dall'aria sul corpo in movimento, che agendo in verso opposto alla velocità, tende costantemente a diminuire la velocità del corpo.

Il moto reale è difficilmente schematizzabile in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio) della pala.

Si riportano qui di seguito le equazioni che governano il moto.

$$\ddot{x} = 0$$

$$\ddot{y} = -g$$

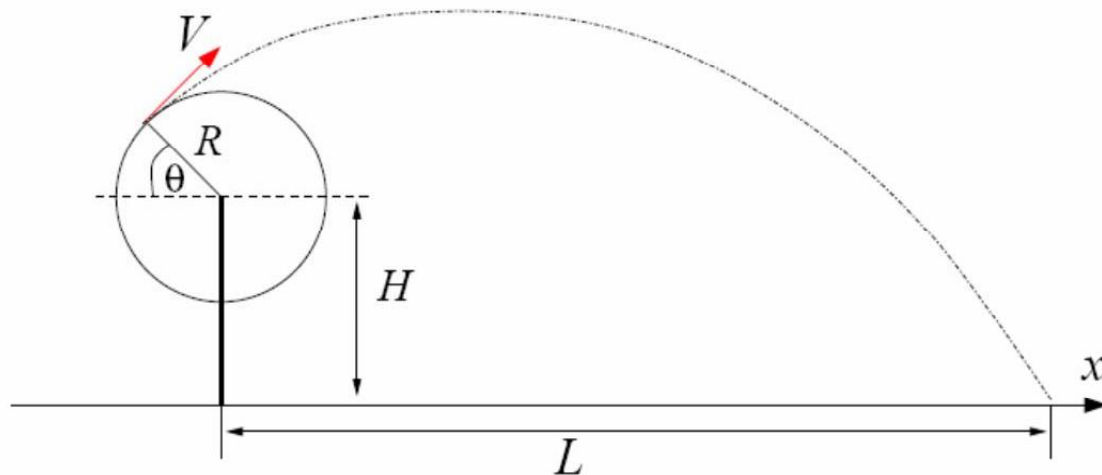
dove  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  è l'accelerazione di gravità. La legge del moto, soluzione delle equazioni sopra riportate è:

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

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

dove  $(x_0, y_0)$  è la posizione iniziale del punto materiale e  $(v_x, v_y)$  la sua velocità. La traiettoria del punto materiale intercetta dunque il suolo al tempo  $T$  tale che  $y(T)=0$ . Dalla legge del moto si evince:

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



La posizione e la velocità iniziale sono funzione dell'angolo  $\theta$  e dalla velocità tangenziale  $V$  del frammento di pala al momento del distacco. Tali grandezze sono legate alla posizione e alla velocità iniziale dalle seguenti relazioni:

$$V_x = V \cos \theta$$

$$V_y = V \sin \theta$$

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

$$y_0 = H + R \sin \theta$$

La gittata  $L$  sarà data dalla risoluzione dell'equazione posto  $y=0$  al variare dell'angolo  $\theta$  e rappresenta la distanza longitudinale percorsa da un corpo lanciato in aria, avente quindi velocità con componente vettoriale in ascissa e in ordinata.

La gittata  $L$  è dunque la distanza data da:

$$L = x(T)$$

e sostituendo l'espressione per  $T$  ricavata sopra si ottiene:

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

Come caso significativo si riporta lo studio condotto da Vestas dal titolo "Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento".

Lo studio in questione determina la distanza che una pala di un aerogeneratore raggiunge nel caso di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione ed è stato effettuato su otto tipologie di aerogeneratori VESTAS:

- V80-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 20 RPM posto su una torre di altezza pari a 80 m;
- V90-1,8/2,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m;

- V90-3,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 18,4 RPM posto su una torre di altezza pari a 105 m;
- V100-1,8/2,0MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16,6 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m;
- V100-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m;
- V100-2,6MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 13,38 RPM posto su una torre di altezza pari a 100 m;
- V110-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 54 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m (125 m);
- V112-3,0/3,3MW con una pala di lunghezza pari a 54,6 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17,7 RPM posto su una torre di altezza pari a 94 m (119 m).
- V117-3,3MW con una pala di lunghezza pari a 57,15 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17,7 RPM posto su una torre di altezza pari a 91.5 m (116.5 m).
- V126-3,3MW con una pala di lunghezza pari a 61,66 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16,5 RPM posto su una torre di altezza pari a 117 m (137 m).

In particolare lo studio condotto sull'aerogeneratore V126-3.3MW, oltre che su altre tipologie presentate, è stato effettuato considerando la condizione più conservativa e cioè considerando le sole forze inerziali ed escludendo l'attrito, per cui i risultati presentati sono da considerare del 20% maggiori di quelli reali, come precisato anche all'interno della specifica stessa.

Tutte le condizioni di rottura sono state assunte avvenire quando il rotore è in posizione upwind e con una velocità del vento pari a 25 m/s.

Questa condizione è anch'essa conservativa in quanto dà la massima gittata fuori dal piano.

Sono state calcolate tre traiettorie nelle seguenti ipotesi.

#### Caso 1: Moto irrotazionale

Assenza di moti intorno agli assi XX, YY e ZZ. L'asse XX è allineato con la traiettoria.

L'asse YY giace sul piano verticale. Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- Nessuna forza di portanza agisce nella direzione in-plane;
- La massima resistenza è generata nella direzione out-of-plane;
- La resistenza nel piano agisce sulla sezione nel piano XZ.

#### Caso 2: Moto irrotazionale

L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano orizzontale. Quando la pala ha raggiunto questa posizione non ci sono ulteriori moti intorno agli assi XX, YY e ZZ.

In questo caso la traiettoria risultante è del tipo "a giavellotto". Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il caso teorico peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi la traiettoria in alto è aumentata dalla forza di portanza generata dalla pala, per cui la gittata è maggiore che in assenza di portanza.

Tre casi sono stati modellati:

- 2a. L'effetto della portanza sul tempo di volo è zero. La soluzione (approssimata) per questo è data dal caso 1 solo nella direzione in-plane.
- 2b. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%.
- 2c. L'effetto della portanza sui tempo di volo è aumentato del 5%, in questo caso si ottiene il maggior tempo di volo.

### Caso 3: Moto irrotazionale complesso

In questo caso si studia il moto della pala al distacco del rotore nel suo complesso considerando anche i moti di rotazione intorno agli assi XX, YY e ZZ. Questo caso è il caso più reale della traiettoria di una pala.

La rotazione della pala intorno all'asse ZZ è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto. L'incidenza del vento out-of-plane sulla pala genera un momento intorno all'asse YY (centro di massa e centro aerodinamico della pala non sono coincidenti). Il vento incidente out-of-plane sulla pala genera ancora un momento intorno all'asse XX (centro di massa della sezione di pala lungo la corda non coincide con il centro aerodinamico). La resistenza della pala sia in-plane che out-of-plane è generata dalla rotazione intorno agli assi XX e YY. Per semplificare lo studio si è assunta l'area della pala pari alia stessa in direzione XY moltiplicata per il quadrato del coseno di 45°.

La portanza in-plane è generata dalla rotazione intorno al piano XX. In questo caso si è assunto un aumento del 10% del tempo di volo dovuto alla portanza.

Tre casi sono stati modellati per tener conto dell'effettivo valore della resistenza:

- 3a.  $C_d$  (in-plane e out-of-plane) = 0,5
- 3b.  $C_d$  (in-plane e out-of-plane) = 1,0
- 3c.  $C_d$  (in-plane e out-of-plane) = 1,5.

Il caso reale da considerare è il caso 3 che porta ai seguenti valori di gittata:



Caso 3	Pala V80 2,0MW	Pala V90 1,8/2,0MW	Pala V90 3,0MW	Pala V100 1,8/2,0MW	Pala V100 2,0MW	Pala V100 2,6MW	Pala V110 2,0MW HH95	Pala V110 2,0MW HH125
Velocità di rotazione	20	17	18,4	16,6	14,9	13,4	14,9	14,9
Tempo di volo	7,6	7	7,5	7	6,5	7	6,5	7
Distanza Vettoriale	99,6	75	85	80	70	60	75	80

Caso 3	Pala V112 3,0/3,3MW HH94	Pala V112 3,0/3,3MW HH119	Pala V117 3,3MW HH91.5	Pala V117 3,3MW HH116,5	Pala V126 3,3MW HH117	Pala V126 3,3MW HH137
Velocità di rotazione	17,7	17,7	17,7	17,7	16,5	16,5
Tempo di volo	7	8	7,5	7,5	7,6	8,0
Distanza Vettoriale	95	110	110	115	115	120

Il calcolo di gittata presentato da Vestas dimostra come anche la gittata della macchina con valore di hub più alto rispetto ai valori proposti nella presente variante rispetti ampiamente tutti i requisiti previsti dal vigente P.I.E.A.R. Basilicata.



Vincenzo Rossi