



REGIONE BASILICATA

PROVINCIA di MATERA



COMUNE di TRICARICO

Committente:



ADEST S.r.l. via Amendola n° 21 – 75100

Amministratore Unico: **Luca O. Leone**



Progetto DEFINITIVO: **Parco Eolico "CORONA PRIMA"**

Oggetto:

CALCOLO ROTTURA ORGANI ROTANTI

Vestas V120 2.2MW

Progettisti:

Ing. Luca O. LEONE - Geol. Francesco P. TRALLI

N.	Data/Date	Descrizione/Description	Preparato/Prepared	Visto/Checked	Approvato/Approved
0.	20/10/2018	Emissione	L.P.	L.L.	L.L.
1.					
2.					
3.					

INDICE

PREMESSA.....	2
1. CENNI SUI PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE.....	2
2. STUDIO COSTRUTTORE VESTAS.....	3
3. CALCOLO PER ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE.....	5
4. CALCOLO PER DISTACCO FRAMMENTO DELLA PALA.....	7
5. CONCLUSIONI.....	10
6. APPENDICE – TABELLE ED ALLEGATI.....	11

PREMESSA

La presente relazione contiene il calcolo della gittata per l'aerogeneratore tipo scelto: VESTAS V120 2.2MW facente parte della documentazione di progetto che la società Adest S.p.a. ha elaborato per la realizzazione e l'esercizio dell'impianto eolico "Corona Prima" di potenza pari a 33 MW, costituito da 15 aerogeneratori da installare in agro di Tricarico in provincia di Matera. Tale aerogeneratore sostituisce la macchina precedente approvata Vestas V110 2.2 MW.

1. CENNI SUI PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Nel dettaglio, le pale sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore; il mozzo, a sua volta, è collegato ad un albero di trasmissione che ruota alla stessa velocità angolare del rotore.

Tutti i componenti sopra menzionati, ad eccezione, del rotore e del mozzo, sono ubicati entro una cabina, detta navicella la quale, a sua volta, è sistemata su un supporto-cuscinetto, in maniera da essere facilmente orientata secondo la direzione del vento.



Si riporta di seguito una figura esemplificativa che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento.



Schematizzazione Verso di Rotazione / Direzione del vento

La conformazione del profilo alare dell'aerogeneratore è fissa, mentre è mobile il rotore sul quale sono ancorate le pale. Questo garantisce il fatto che il rotore possa orientarsi rispetto al vento in modo tale da offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo indipendentemente dalla direzione del vento un verso orario di rotazione. Questa considerazione ci serve per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale ed a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano. Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva e quindi si capisce la direzione lungo la quale l'eventuale pala o parte di essa che si distacca percorre il suo moto. Mettendo in relazione la traiettoria del corpo che si distacca con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può essere o meno un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

2 STUDIO COSTRUTTORE VESTAS

Il costruttore degli aerogeneratori Vestas Wind Systems A/S ha prodotto un documento denominato "Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento" (Rev.13 -07/03/2014), nel quale sono riportati i risultati dei calcoli della distanza che una pala di un aerogeneratore raggiunge nel caso di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione. Il

calcolo è stato eseguito per 10 modelli di aerogeneratori diversi. Per l'aerogeneratore con caratteristiche più vicine a quello oggetto della presente relazione, ovvero l'aerogeneratore V117 (diametro rotore 117 m e torre di altezza pari a 91,5 m), è prevista **una gittata massima di circa 135 m** (Casi 1, 2a, 2b e 2c), valore considerato peraltro ampiamente conservativo tanto che nelle conclusioni dello stesso Studio viene decrementato di circa 18% e **portato a 110 m** circa (caso 3).

Da un confronto tra l'aerogeneratore V117 utilizzato da Vestas per il calcolo e quello del progetto in esame (V120) risulta che i parametri due macchine sono assolutamente confrontabili vedi tabella in basso:

Tipo aerogeneratore	V117 3.3MW	V120 2.2MW
Diametro (m)	117	120
Lunghezza pala (m)	57,5	59
Altezza mozzo (m)	91,5	95
Velocità rotazione Max (giri/min)	17,7	14,9

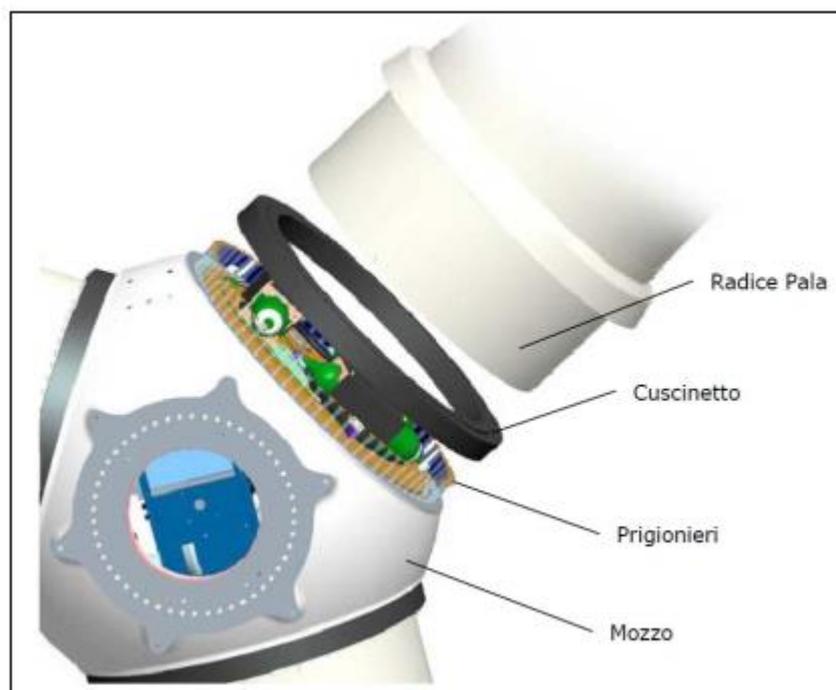
Avendo la gittata massima, a seguito della rottura di una pala, una dipendenza lineare con l'altezza del mozzo ed il raggio della pala e quadratica rispetto alla velocità di rotazione del rotore, si desume facilmente e la gittata massima applicata al modello V120 che è caratterizzato da una velocità di rotazione inferiore del 19% del modello V117 avrà una traiettoria più breve dei valori calcolati (110 o in eccesso 135 m).

In aggiunta il costruttore Vestas nel dettagliato Report, forte dell'esperienza del suo parco macchine installato, conferma che su una flotta operativa di 15.679 unità, nel caso di distacco di una pala il moto è stato di tipo *"rotazionale complesso"* e le distanze raggiunte sono state inferiori a quelle calcolate nello stesso Report.

3. CALCOLO PER ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE

Per completezza viene eseguito il calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'aerogeneratore V120 seguendo il principio della balistica applicata al moto dei proiettili.

Si assume il distacco della pala alla radice nel punto di accoppiamento Pala/Mozzo (vedi figura sottostante).



Dettagli dell'attacco di una pala al mozzo

Evidenziamo ancora che i calcoli sono fatti considerando nullo l'attrito con l'aria considerando un corpo puntiforme e quindi con risultati in eccesso rispetto ad un calcolo più complesso che può fare solo il costruttore stesso, dotato di informazioni più dettagliate ma riservate e non divulgabili.

Nel caso in esame (tipologia VESTAS V120) si suppone che l'eventuale rottura della pala avvenga alle peggiori condizioni possibili ovvero:

- a. alla velocità massima del rotore, pari a circa 14,9 giri/minuto
- b. nel punto di ascissa e ordinata in cui la gittata è massima, con $\text{angolo} = \pi/4$
- c. con il centro di massa posizionato ad $1/3$ della lunghezza della pala, in

prossimità del mozzo.

L'aerogeneratore di tipo VESTAS V120 previsto ha altezza al mozzo uguale a 95 m, le pale costituenti il rotore sono lunghe circa 60 m.

Definizioni

H_m = Altezza al mozzo dell'aerogeneratore = 95 m

L_p = Lunghezza della pala dell'aerogeneratore = 60 m

D_{cm} = Distanza dal mozzo del Centro di Massa della Pala = $L_p / 3 = 20$ m

V_{ang} = Max Velocità Angolare Rotore = 14,9 Giri/Minuto = $14.9 * 2\pi / 60 = 1.56$ Rad/sec

Formule e calcoli risultanti

L'Ordinata di Massima Velocità O_{mv} al momento di rottura è data dalla somma dell'altezza del mozzo più la componente verticale del Centro di Massa:

$$i. \quad O_{mv} = \text{Ordinata di Massima Velocità} = H_m + D_{cm} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{109,14 \text{ m}}$$

Analogamente l'ascissa di Massima Velocità A_{mv} al momento di rottura:

$$ii. \quad A_{mv} = \text{Ascissa di Massima Velocità} = - D_{cm} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{-14,14 \text{ m}}$$

La Velocità Lineare al Centro di Massa V_{max} è desunta dalla Velocità Angolare V_{ang}

$$iii. \quad V_{max} = \text{Velocità Lineare al Centro di Massa} = V_{ang} * D_{cm} = \mathbf{31.21 \text{ m/sec}}$$

Le componenti Verticale V_y ed Orizzontale V_x di tale velocità Lineare al Centro di Massa si ottengono moltiplicando per il Seno ed il Coseno dell'angolo:

$$iv. \quad V_y = \text{Componente Verticale Velocità} = V_{max} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{22.07 \text{ m/sec}}$$

$$v. \quad V_x = \text{Componente Orizzontale Velocità} = V_{max} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{22.07 \text{ m/sec}}$$

Il tempo necessario T_y perché la componente verticale della velocità sia nullo è dato dalla formula:

$$\triangleright \quad T_y = \text{Tempo di decelerazione Verticale} = V_y / 9.8 \text{ m/sec}^2 = \mathbf{2,25 \text{ sec}}$$

L'altezza Massima H_{max} si ottiene dalla formula:

$$\boxplus \quad H_{max} = O_{mv} + V_y * T_y - 1/2 * g * T_y^2 = \mathbf{133.96 \text{ m}}$$

Il tempo necessario T_{max} affinché l'elemento rotante precipiti a terra dalla sommità si ottiene dalla relazione:

➤ $T_{\max} = \text{tempo di caduta} = \sqrt{133,96/9,8} \text{ m/sec}^2 = 3.70 \text{ sec}$

La distanza massima DL_{\max} dalla base della torre percorsa dall'elemento rotante distaccatosi è quindi fornito dalla formula:

$$DL_{\max} = V_X * (T_{\max} + T_y) + A_{mv} + (L_p - D_{cm}) = 157,10 \text{ m}$$

4. CACOLO PER DISTACCO FRAMMENTO DELLA PALA

L'evento della rottura di un frammento consistente di pala risulta meno frequente¹. Per le caratteristiche del materiale strutturale, tende ad essere una rottura progressiva.



Esempio di rottura pala senza distacco

Pertanto, nella maggior parte dei casi si ha una prima flessione della struttura con conseguente

inevitabile urto con la torre (posta sottovento nella quasi totalità delle WTG).

La conseguente rottura dà luogo a traiettorie varie che non sono deterministicamente calcolabili.

Nella maggior parte dei casi di lancio di piccoli frammenti di pala la causa registrata è la concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

¹ Analysis of Risk-Involved Incidents of Wind Turbine – version 1.1 Januar 2005 – ECN: per la rottura Rottura Pala riporta una probabilità di $8,4 \cdot 10^{-4}$ [1/y] mentre per il frammento $2,6 \cdot 10^{-4}$ [1/y].



Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica

Tale fenomeno è stato considerato dai costruttori che hanno iniziato a dotare gli aerogeneratori di un sistema di convogliamento della corrente di fulminazione costituito da recettori metallici posti lungo la pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale. In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità della pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. È possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.

Per avere un ordine di grandezza sulla distanza raggiunta dai frammenti di una pala eolica, si fa riferimento allo studio “Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan”. Secondo tale studio, la probabilità che un frammento staccatosi di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di 2×10^{-5} .

Il già citato “Studio Vestas” conclude l’analisi confermando che *“l’effetto di distacco di una porzione della pala è escluso, considerate le caratteristiche meccaniche della pala, ovvero, una struttura monolitica della trave di sostegno che rimane vincolata al mozzo attraverso una collegamento bullonato”*.

4.1. GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA

Anche volendo stabilire quale sia la gittata massima del frammento di pala, facendo riferimento al rischio accettato² in sede progettuale (pari a 10^{-6}) si raggiunge tale valore a meno di 157 m.

A 157 m la probabilità diminuisce ancora di un fattore 10 e, per eventi rari come quelli della rottura di una pala la probabilità diventa praticamente nulla.

² European Wind Turbine Standard

5. CONCLUSIONI

Partendo dai dati degli aerogeneratori in merito alla velocità di rotazione (rpm) sono stati eseguiti dei calcoli di gittata con la teoria della fisica del punto materiale. Il calcolo illustrato nei paragrafi precedenti porta ad un valore massimo di gittata pari a **157.10 m** nel caso di aerogeneratore con diametro rotore pari a 120m. Pertanto, la gittata massima calcolata in entrambi i casi garantisce la distanza di sicurezza sia dalle strade provinciali che statali sia da edifici presenti nell'area del parco. Si sottolinea come, da dati messi a disposizione da fornitori di turbine eoliche, il calcolo rigoroso (paragrafo 2) porta a risultati meno cautelativi di quanto non lo siano quelli effettuati in questa sede.

ETRS89/UTM Zone 33N				Aerogeneratore Vestas V120 2.2 MW – mozzo h 95 m					
	ID WTG	Est	Nord	Tipo WTG	Diam. [m]	Hub [m]	Distanza Immobili [m]	Distanza Viabilità [m]	Gittata Massima [m]
1	WTG 01	602072,8	4504230,4	V120	120	95	>387,5	1902	157,1
2	WTG 02	601744,3	4503514,3	V120	120	95	>387,5	1123	157,1
3	WTG 04	601804,8	4503873,7	V120	120	95	>387,5	1458	157,1
4	WTG 05	602700,3	4503923,4	V120	120	95	>387,5	1789	157,1
5	WTG 06	599784,8	4505307,1	V120	120	95	>387,5	651	157,1
6	WTG 07	602637,0	4503570,5	V120	120	95	>387,5	1419	157,1
7	WTG 08	602439,0	4504918,8	V120	120	95	>387,5	2675	157,1
8	WTG 09	602577,8	4503214,0	V120	120	95	>387,5	1065	157,1
9	WTG 11	602333,5	4504480,1	V120	120	95	>387,5	2235	157,1
10	WTG 13	604008,6	4502902,1	V120	120	95	>387,5	1514	157,1
11	WTG 14	600071,2	4505550,6	V120	120	95	>387,5	1107	157,1
12	WTG 15	604039,5	4502543,4	V120	120	95	>387,5	1231	157,1
13	WTG 16	603857,8	4502069,9	V120	120	95	>387,5	727	157,1
14	WTG 18	604840,6	4502639,7	V120	120	95	>387,5	1965	157,1
15	WTG 19	605027,0	4502300,7	V120	120	95	>387,5	1795	157,1

Come visibile dalla tabella sopra riportata, la gittata è in entrambi i casi inferiore rispetto a tutte le distanze turbine/strade provinciali e turbine/immobili estrapolate dal layout dell'impianto eolico di Corona Prima.

6. ALLEGATI

All. 15 Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento (Vestas Technical Report Rev.13 – 09/07/2014)