

Volta Green Energy

REGIONE SICILIA
Provincia di Trapani
COMUNI DI MAZARA DEL VALLO E MARSALA



PROGETTO

PARCO EOLICO CHELBI PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE:

VGE 03

Piazza Manifattura, 1 – 38068 Rovereto (TN)
Tel. +39 0464 625100 - Fax +39 0464 625101 - PEC vge03@legalmail.it

PROGETTISTA:



Hydro Engineering s.s.
di Damiano e Mariano Galbo
via Rossotti, 39
91011 Alcamo (TP) Italy



OGGETTO DELL'ELABORATO:

RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI

N° Elaborato	DATA	SCALA	FOGLIO	FORMATO	CODICE DOCUMENTO
CH-AP27	Aprile 2021	/	1 di 24	A4	

NOME FILE: CH-AP27 RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI_REV00

Questo elaborato è di proprietà di VGE 03 ed è protetto a termini di legge

Volta g.e.
green energy



REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	Aprile 2021	Prima emissione	EG	GL	MG

1	PREMESSA.....	4
2	STORICO DEGLI INCIDENTI.....	6
3	CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE.....	7
4	AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO	9
5	DESCRIZIONE DELL'AEROGENERATORE.....	10
6	ROTTURA PALA.....	12
6.1	FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA.....	12
6.2	MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO.....	13
6.3	ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE.....	14
6.4	DETERMINAZIONE GITTATA AEROGENERATORE D=170M.....	17
6.5	FRAMMENTO DI PALA	22
6.6	GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA	23
7	CONCLUSIONI.....	24

1 PREMESSA

VGE 03 S.r.l. (di seguito anche la “Società”) è una società appartenente al Gruppo Volta Green Energy (di seguito anche “VGE”).

Volta Green Energy, con sede in 38068 Rovereto (TN), Piazza Manifattura n. 1, iscritta alla CCIAA di Trento al n° 02469060228, REA TN – 226969, Codice Fiscale e Partita IVA 02469060228 opera nel settore della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili e nasce dall'esperienza più che decennale di professionisti, con oltre 350 MW di parchi eolici e 16 MW di impianti fotovoltaici sviluppati, costruiti e gestiti.

Ad oggi, Volta Green Energy impiega direttamente poco meno di una trentina di risorse e gestisce, per conto di terzi, sette impianti eolici installati in Italia per 300,5 MW complessivi. Accanto all'asset management degli impianti (completa gestione degli aspetti tecnici, permitting e patrimoniale, regolatori, finanziari, assicurativi, fiscali e di compliance) Volta Green Energy presta assistenza a terzi e svolge in proprio la ricerca e sviluppo di nuovi progetti, il monitoraggio e supervisione impianti 24/7 attraverso il proprio centro di telecontrollo e l'O&M (operation & management).

Ogni attività è svolta sulla base della conoscenza delle specifiche criticità e nel rispetto degli equilibri sociali, ambientali e territoriali in cui si inseriscono gli impianti in esercizio e le nuove iniziative. Le attività svolte da Volta Green Energy afferiscono all'intero processo che porta alla produzione di energia da fonti rinnovabili: sviluppo di nuovi progetti, finanziamento, costruzione, Operation & Maintenance, vendita dell'energia; queste attività coinvolgono direttamente, l'ambiente, le comunità dove sono presenti gli impianti ed i clienti. Per questo, Volta Green Energy è dotata di un Sistema di Gestione Integrato che include temi etici e legali (D.Lgs. 231/01), requisiti di sistema ambientale (ISO 14001:2015) e di gestione salute e sicurezza (BS-OHSAS 18001:07). Volta Green Energy ha recentemente completato i lavori di una delle prime installazioni eoliche in Italia che, da aprile 2020 con successo, è operativa su base merchant, e cioè si sostiene economicamente senza il ricorso a produzione incentivata. Si tratta di due ampliamenti di un parco eolico già in esercizio da 48 MW con una potenza aggiuntiva di 18 MW. Tutte le altre attività di realizzazione degli ampliamenti (ingegneria, permitting, lavori civili ed elettrici, acquisti, consulenze, ecc), le attività di collaudo, nonché gestione, coordinamento e armonizzazione tra tutti i diversi soggetti coinvolti e le rispettive attività, sono state svolte da Volta Green Energy, le cui professionalità avevano portato avanti anche lo sviluppo delle iniziative.

VGE 03, anch'essa con sede in 38068 Rovereto (TN), Piazza Manifattura n. 1, iscritta alla CCIAA di Trento al n° 04805612237, REA n° TN - 237979, Codice Fiscale e Partita IVA 04805612237, ha in progetto la realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, mediante l'installazione di 7 aerogeneratori di potenza unitaria pari

a 6 MW, per una potenza complessiva di 42 MW, sito in località Chelbi, nei Comuni di Mazara del Vallo e di Marsala, in provincia di Trapani (di seguito anche “Parco Eolico Chelbi”).

Secondo quanto previsto dal preventivo prot. n. 34740347 rilasciato da Terna SpA in data 22/02/2021, poi accettato in data 31/03/2021, l'impianto si collegherà alla RTN per la consegna della energia elettrica prodotta attraverso la condivisione di una stazione utente di trasformazione e consegna (di seguito anche “SSEU” ed appartenente alla società VGE01) da collegare in antenna a 220 kV con una nuova stazione elettrica di smistamento (di seguito anche “SE”) a 220 kV della RTN, da inserire in entra - esce sulla linea RTN a 220 kV “Fulgatore – Partanna”.

Il modello tipo di aerogeneratore (di seguito anche “WTG”) scelto, dopo opportune considerazioni tecniche ed economico finanziarie, è il modello tipo Siemens Gamesa SG170 da 6 MW con altezza mozzo pari a 115 m, diametro rotore pari a 170 m e altezza massima al top della pala pari a 200 m. Questo modello tipo di aerogeneratore è allo stato attuale quello ritenuto più idoneo per il sito di progetto dell'impianto.

L'analisi condotta consiste nello stimare l'impatto che può avere la rottura dell'organo rotante di una torre eolica, con un conseguente distacco e lancio di una pala o di un frammento di questa. Tutte le analisi qui effettuate non tengono conto degli effetti di portanza aerodinamica sulle pale, ma unicamente degli effetti gravitazionali. Gli studi condotti hanno tuttavia dimostrato che questa approssimazione rispecchia piuttosto bene la realtà.

L'analisi per la combinazione dei carichi, per i materiali usati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura fa riferimento alla norma CEI EN61400-1.

L'analisi è stata condotta per i seguenti casi:

- distacco di una intera pala eolica;
- distacco di un frammento di pala eolica.

In qualsiasi caso, la gittata massima e la velocità all'impatto sono dei fattori determinanti per la stima del rischio. La gittata massima dipende dal prodotto “raggio della pala x velocità di rotazione”.

Il calcolo presenta comunque alcune complessità in quanto le variabili in gioco sono numerose ed il risultato può essere soltanto di tipo probabilistico in quanto legato alle modalità ed al momento del distacco. Infatti, un corpo lanciato in aria in presenza di forte vento potrebbe dar luogo ad effetti di “portanza” che possono prolungare i tempi di volo. L'effetto viscoso dell'aria, d'altra parte, ha un effetto opposto frenando il corpo stesso. Considerando, quindi, la natura della pala avente un profilo aerodinamico, lo studio del moto risulta complesso, a causa di tutte le forze e dei momenti che nascono al momento del distacco e nell'interazione col vento.

2 STORICO DEGLI INCIDENTI

Il tasso d'incidentalità, nell'ultimo decennio, è ancora diminuito a seguito dell'evoluzione tecnologica e del miglioramento delle macchine eoliche, malgrado l'aumento medio delle loro dimensioni.

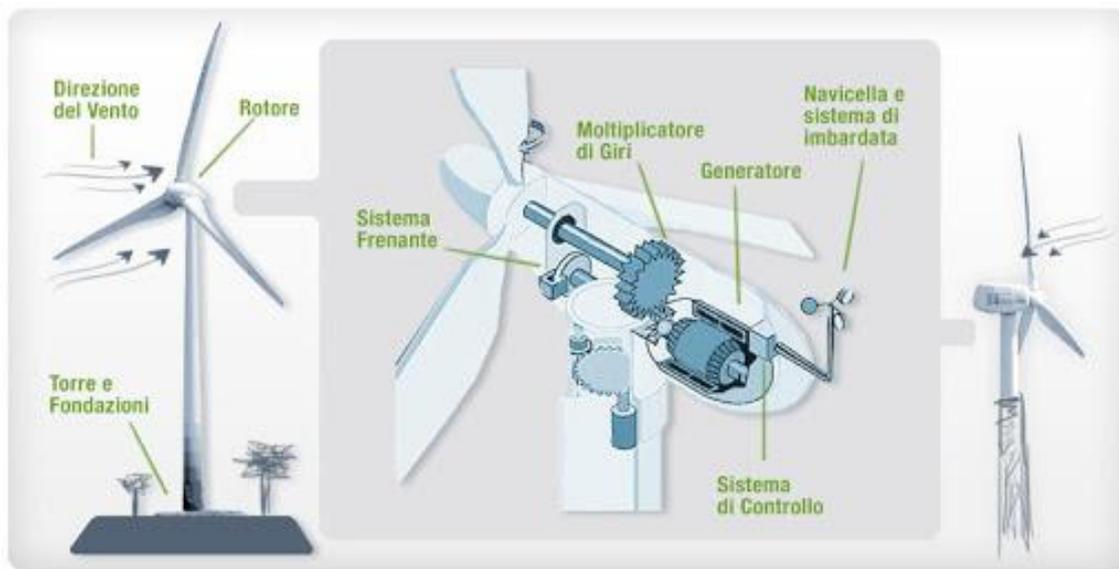
Uno studio danese ha condotto su 18 mesi, tra il 1998 e i 1999, un'analisi riguardante le pale, le navicelle e le torri di 2.130 rotori, considerando una potenza complessiva di impianti di 540 MW. Su 3.195 anni cumulati di funzionamento, solo 7 incidenti hanno comportato la distruzione delle pale. Il tasso è dunque di un incidente ogni 457 anni-macchina. Si noti che la Danimarca presenta maggiori rischi di guasti e di sospensione della produzione a causa della presenza di brina e di ghiaccio.

Un altro studio danese a partire da dati registrati su 120 mesi tra il 1993 e il 2003 in un parco di 1.912 impianti mostra una probabilità di distruzione di 0,00083 impianti per anno. In ambito rurale, la correlazione di questa statistica (6×10^{-5} /anno) con la probabilità di occupazione di un m^2 di terreno da parte di una persona individua una probabilità globale di ferire qualcuno molto bassa.

3 CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Le pale di un aerogeneratore sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore. Vi è un sistema di controllo aerodinamico, chiamato imbardata, che permette il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, modificando l'orientamento rispetto alla direzione del vento, per offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione.

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

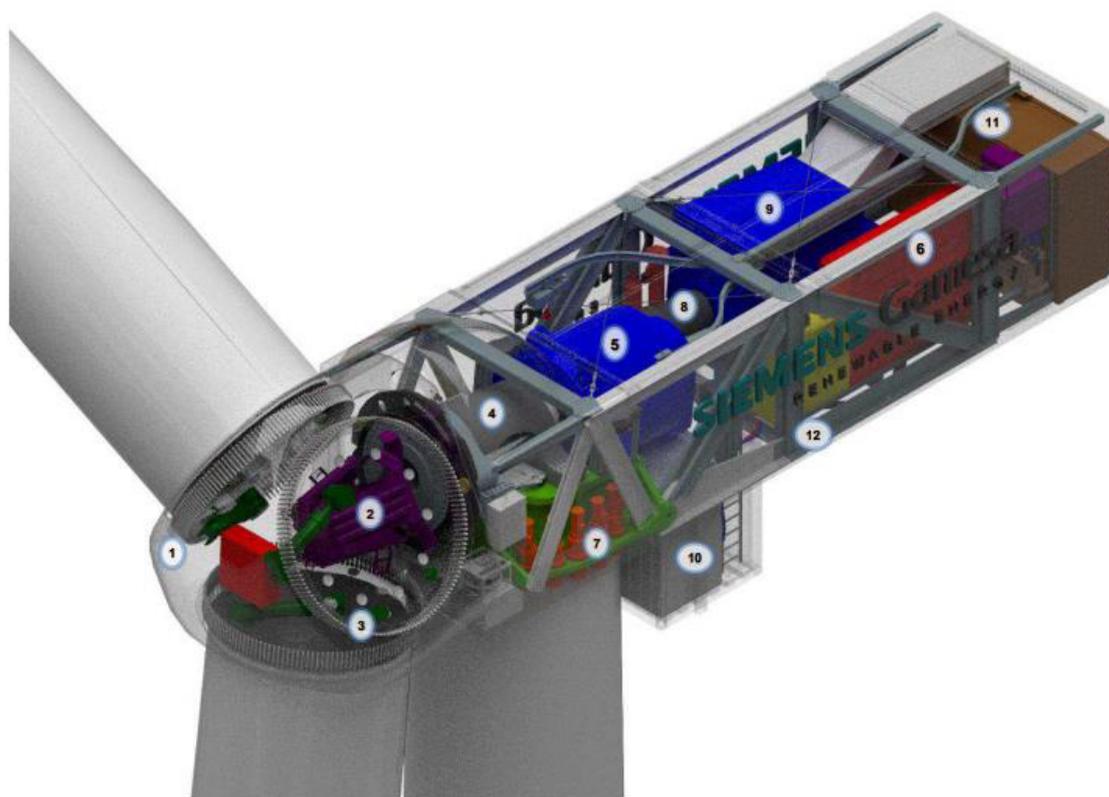


Tipico Aerogeneratore

Questa considerazione servirà 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 e a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva che individua la direzione del moto del corpo che si distacca. Mettendo in relazione tale traiettoria con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può rappresentare un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

La navicella dell'aerogeneratore da un punto di vista meccanico si presenta come segue:



- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1 Hub | 7 Yaw system |
| 2 Pitch system | 8 High speed shaft |
| 3 Blade bearings | 9 Generator |
| 4 Low speed shaft | 10 Transformer |
| 5 Gearbox | 11 Cooling system |
| 6 Electrical cabinets | 12 Rear Structure |

4 AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO

Le macchine di riferimento per il calcolo avranno le seguenti caratteristiche:

ROTORE

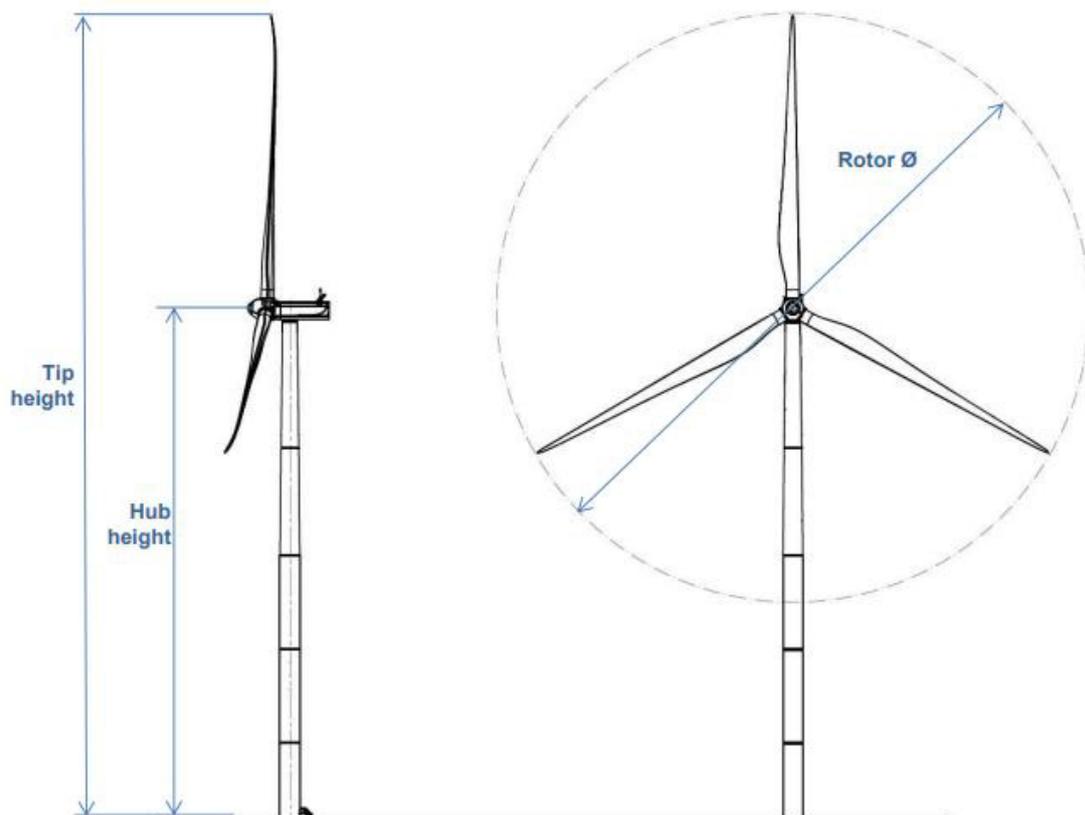
- diametro 170 m
- area spazzata 22.698 m²
- velocità di rotazione massima 10,6 rpm
- numero pale 3

TORRE

- tipo: tubolare
- struttura: sezioni collegate tramite flangiatura
- altezza 115 m

FUNZIONAMENTO

- cut-out 25 m/s (velocità del rotore gradualmente ridotta)
- Potenza 6.0 MW



5 DESCRIZIONE DELL'AEROGENERATORE

L'aerogeneratore è una macchina che sfrutta l'energia cinetica posseduta del vento, per la produzione di energia elettrica, descritta nell'elaborato CH--CE09 – TIPO DEL MODELLO DI AEROGENERATORE PREVISTO..

Sul mercato esistono diverse tipologie di aerogeneratori, ad asse orizzontale e verticale, con rotore mono, bi o tripala, posto sopra o sottovento. Il tipo di aerogeneratore previsto per l'impianto in oggetto è un aerogeneratore ad asse orizzontale con rotore tripala e una potenza massima di 6000 KW, le cui caratteristiche principali sono di seguito riportate:

- rotore tripala a passo variabile, di diametro di 170 m, posto sopravvento al sostegno, in resina epossidica rinforzata con fibra di vetro, con mozzo rigido in acciaio;
- navicella in carpenteria metallica con carenatura in vetroresina e lamiera, in cui sono collocati il generatore elettrico e le apparecchiature idrauliche ed elettriche di comando e controllo;
- sostegno tubolare troncoconico in acciaio, avente altezza fino all'asse del rotore al pari a 115 m.

L'altezza complessiva dell'aerogeneratore è pari a 200 m.

I tronchi di torre sono realizzati da lastre in acciaio laminate, saldate per formare una struttura tubolare troncoconica.

Si tratta di aerogeneratori di ultima generazione, già impiegati estesamente in altri parchi italiani/UE, che consentono il miglior sfruttamento della risorsa vento e che presentano garanzie specifiche dal punto di vista della sicurezza.

La turbina viene di solito equipaggiata, in accordo alle disposizioni dell'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), con un sistema di segnalazione diurna e notturna per la segnalazione aerea secondo normativa di sicurezza.

La segnalazione notturna di solito consiste nell'utilizzo di una luce rossa da installare sull'estradosso della navicella dell'aerogeneratore.

La segnalazione diurna consiste di solito nella verniciatura della parte estrema della pala con tre bande di colore rosso ciascuna di 6 m per un totale di 18 m.

La navicella è dotata di un sistema antincendio, che consiste di rilevatori di fumo e CO, i quali rivelano gli incendi e attivano un sistema di spegnimento ad acqua atomizzata ad alta pressione nel caso di incendi dei componenti meccanici e a gas inerte (azoto) nel caso di incendi dei componenti elettrici (cabine elettriche e trasformatore). In aggiunta a ciò, il rivestimento della navicella contiene materiali autoestinguenti.

L'aerogeneratore è dotato di un completo sistema antifulmine, in grado di proteggere da danni diretti ed indiretti sia alla struttura (interna ed esterna) che alle persone. Il fulmine viene "catturato" per mezzo di un sistema di conduttori integrati nelle pale del rotore, disposti ogni 5

metri per tutta la lunghezza della pala. Da questi, la corrente del fulmine è incanalata attraverso un sistema di conduttori a bassa impedenza fino al sistema di messa a terra. La corrente di un eventuale fulmine è scaricata dal rotore e dalla navicella alla torre tramite collettori ad anelli e scaricatori di sovratensioni. La corrente del fulmine è infine scaricata a terra tramite un dispersore di terra. I dispositivi antifulmine previsti sono conformi agli standard della più elevata classe di protezione (Classe I), secondo lo standard internazionale IEC 61024-1.

6 ROTTURA PALA

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l'azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; normalmente si utilizzano materiali compositi che sfruttano le caratteristiche meccaniche così da far fronte ai carichi aerodinamici imposti.

Le modalità di rottura sono classificabili in due gruppi:

- 1) Rottura della pala alla radice.
- 2) Rottura di frammento.

6.1 Fattori che influenzano la gittata

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala o della sezione di pala distaccata, si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a “giavelotto” del frammento. Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavelotto è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni resistive del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala/frammento-di-pala, si oppongono al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

La traiettoria iniziale della pala/sezione-di-pala distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia. Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione-di-pala influenzando i movimenti rotatori in fase 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.

Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

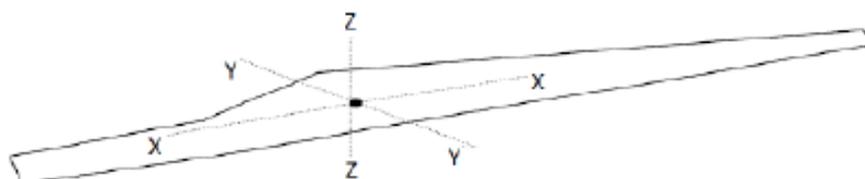
Distanza percorsa

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.

6.2 Moto rotazionale complesso

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto “a giavellotto” sono da ritenere, come accennato, poco realistici data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento. Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello “Complex Rotational Motion”, che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx , yy , zz .



La rotazione della pala intorno all'asse zz è causata dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano. La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente out of plane sulla pala/sezione di pala. In particolare, si genera:

- un momento intorno all'asse yy : centro di massa e centro aerodinamico della pala/sezione di pala non coincidono;
- un momento intorno all'asse xx : centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala/frammento di pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise. Pertanto, il moto

della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto sia *in plane* che *out plane* è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy.

La massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- dalla dimensione del frammento;
- dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala.

Possiamo pertanto concludere che:

- se effettuiamo un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale otteniamo valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale)
- più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione.

6.3 Rottura della pala alla radice

La rottura della pala alla radice è un evento che storicamente è risultato probabile (rispetto al numero di rotture totali) in quanto la sezione di attacco risulta assai “critica” dal punto di vista strutturale.

Le cause sono sostanzialmente due:

- 1) La discontinuità della struttura che passa da un carico distribuito sulle fibre alla flangia di attacco crea inevitabili concentrazioni tensionali che con l'andare del tempo possono creare problemi di affaticamento con conseguente rottura. C'è da dire che i costruttori hanno ben chiaro il problema e che negli ultimi anni si sono introdotti diversi accorgimenti che hanno migliorato di molto le prestazioni.
- 2) La rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo. Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni serrati opportunamente durante l'installazione della turbina.

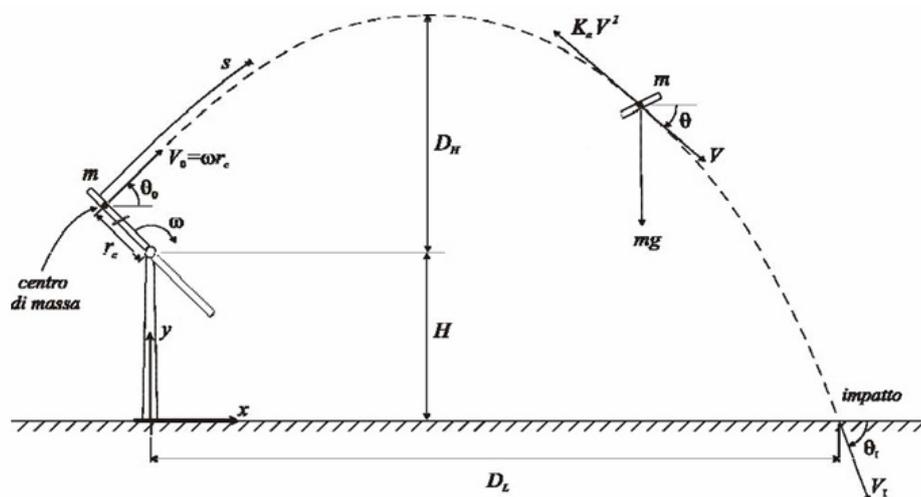
Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei bulloni stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono determinare la

rottura per fatica dei bulloni e di conseguenza il possibile distacco della pala.

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

- 1) distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- 2) baricentro posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala;
- 3) assenza di attriti viscosi durante il volo: questa ipotesi risulta conservativa considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20%;
- 4) distacco in corrispondenza di un angolo di 315° rispetto alla verticale, che dal punto di vista teorico garantisce la massima gittata (moto in senso orario);
- 5) distacco alla rotazione di funzionamento massima;
- 6) vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- 7) assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.



Traiettoria della pala

Equazioni del moto applicate:

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono

$$x'' = 0$$

$$y'' = -g$$

dove $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità. La legge del moto, soluzione di queste equazioni è:

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

$$y(t) = y_0 + v_y t + 1/2 g t^2$$

dove $(x_0; y_0)$, è la posizione iniziale del punto materiale e $(v_x; v_y)$ è la sua velocità.

La velocità V_0 ha due componenti:

$$v_x = V_0 \cos \theta$$

$$v_y = V_0 \sin \theta$$

La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che $Y(T)=0$; dalla legge del moto si ottiene

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

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

Consideriamo il moto bidimensionale dell'elemento rotante, come il moto di un punto materiale concentrato nel baricentro, 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. 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 del corpo in movimento. Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

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

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, ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa $r_g = 28,83$ m essendo il diametro del rotore $D = 170$ m ed il raggio di ciascuna pala $R = 85,0$ m circa.

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare. Il numero di giri valutato per questa analisi è pari a 10,6 giri/minuto.

Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n / 60 r_g = 31,43 \text{ m/sec}$$

Per tenere conto degli effetti attritivi dell'area, tale valore viene realisticamente ridotto in fase di calcolo di un'aliquota pari al 10%.

La posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo θ della pala al momento del distacco.

Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$\begin{aligned}x_o &= -r_g \cos(\vartheta); \\y_o &= H + r_g \sin(\vartheta); \\v_x &= V_g \sin(\vartheta); \\v_y &= V_g \cos(\vartheta).\end{aligned}$$

La gittata L è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della pala; l'altezza H è l'altezza del mozzo della torre (115 m). Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = X(t)$$

Sostituendo l'espressione ricavata per T, otteniamo la gittata L in termini di Vg e di ϑ :

$$\text{Gittata max: } v_{x0} * (-v_{y0} * (v_{y0}^2 - 4(1/2H_g g)) / g)$$

6.4 Determinazione gittata aerogeneratore D=170m

L'applicazione delle formule sopra descritte ha portato alla determinazione del valore di gittata massima di seguito esposto.

Dati di input:

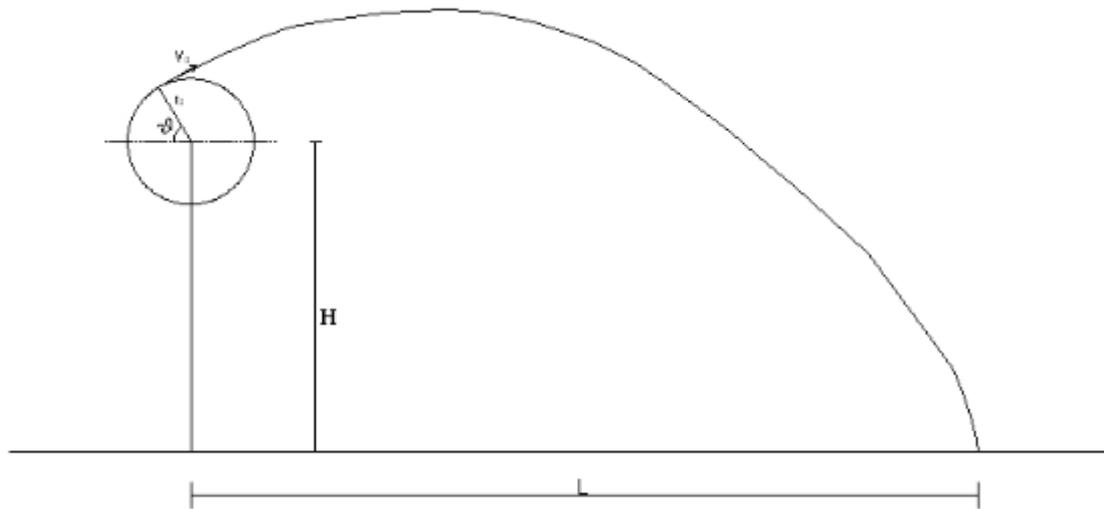
$$V_{g,calc} = 28,29 \text{ m/s};$$

$$r_g = 28,33 \text{ m};$$

$$g = 9.81 \text{ m/s};$$

$$H = 115 \text{ m}.$$

Il valore della gittata dipenderà dall'angolo ϑ .

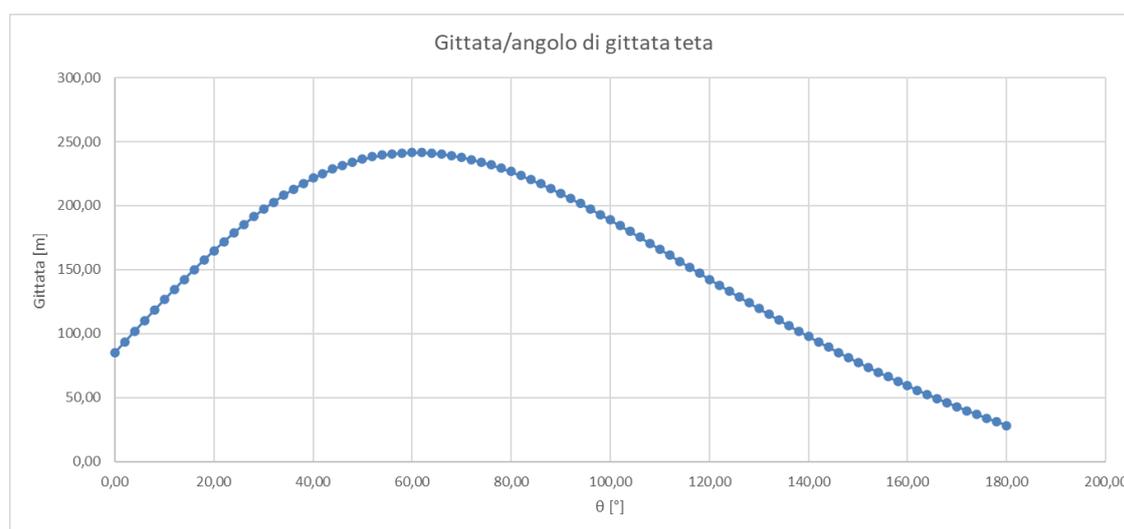


Si noti che fissato un generico angolo ϑ , la gittata aumenta quadraticamente con V_g salvo i casi particolari $\vartheta = \pm 90^\circ$, $\vartheta = 0^\circ$, $\vartheta = 180^\circ$, nei quali la gittata aumenta linearmente con V oppure è pari a r_g . Come si evidenzia dal grafico e numericamente dalla tabella sotto riportata il valore massimo della gittata è pari a 184,87 m circa con un angolo di distacco di circa $\vartheta = \pi/3$ rad. e più precisamente pari a 60° . A tale valore dovrà aggiungersi la distanza del vertice della pala dal baricentro pari a 56,67 m, per un valore complessivo della gittata: $L_{tot} = 241,50$ m.

g	n [°]	ω [rad/s]	r_g [m]	D [m]	R [m]	V_0 [m/s]	V_0 [m/s]-rid	v_{x0}	v_{y0}	ϑ [°]	ϑ [rad]	Hrot [m]	Yg [m]	Hg [m]	L_g [m]	Gmax [m]	Xg [m]	G_{TOT} [m]
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	28,29	0,00	0,00	0,00	115,00	0,00	115,00	56,67	0,00	28,33	85,00
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	28,27	0,99	2,00	0,03	115,00	0,99	115,99	56,67	8,43	28,32	93,41
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	28,22	1,97	4,00	0,07	115,00	1,98	116,98	56,67	16,86	28,26	101,79
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	28,14	2,96	6,00	0,10	115,00	2,96	117,96	56,67	25,28	28,18	110,13
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	28,02	3,94	8,00	0,14	115,00	3,94	118,94	56,67	33,66	28,06	118,38
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	27,86	4,91	10,00	0,17	115,00	4,92	119,92	56,67	41,97	27,90	126,54
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	27,67	5,88	12,00	0,21	115,00	5,89	120,89	56,67	50,18	27,71	134,56
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	27,45	6,84	14,00	0,24	115,00	6,85	121,85	56,67	58,27	27,49	142,43
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	27,20	7,80	16,00	0,28	115,00	7,81	122,81	56,67	66,23	27,24	150,13
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	26,91	8,74	18,00	0,31	115,00	8,76	123,76	56,67	74,01	26,95	157,63
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	26,59	9,68	20,00	0,35	115,00	9,69	124,69	56,67	81,61	26,62	164,90
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	26,23	10,60	22,00	0,38	115,00	10,61	125,61	56,67	89,00	26,27	171,93
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	25,85	11,51	24,00	0,42	115,00	11,52	126,52	56,67	96,16	25,88	178,71
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	25,43	12,40	26,00	0,45	115,00	12,42	127,42	56,67	103,06	25,47	185,20
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	24,98	13,28	28,00	0,49	115,00	13,30	128,30	56,67	109,70	25,02	191,39
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	24,50	14,15	30,00	0,52	115,00	14,17	129,17	56,67	116,06	24,54	197,27
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	23,99	14,99	32,00	0,56	115,00	15,01	130,01	56,67	122,12	24,03	202,81
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	23,45	15,82	34,00	0,59	115,00	15,84	130,84	56,67	127,86	23,49	208,02
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	22,89	16,63	36,00	0,63	115,00	16,65	131,65	56,67	133,28	22,92	212,87
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	22,29	17,42	38,00	0,66	115,00	17,44	132,44	56,67	138,37	22,33	217,36
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	21,67	18,19	40,00	0,70	115,00	18,21	133,21	56,67	143,11	21,70	221,48
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	21,02	18,93	42,00	0,73	115,00	18,96	133,96	56,67	147,50	21,06	225,22
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	20,35	19,65	44,00	0,77	115,00	19,68	134,68	56,67	151,53	20,38	228,58
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	19,65	20,35	46,00	0,80	115,00	20,38	135,38	56,67	155,20	19,68	231,55
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	18,93	21,02	48,00	0,84	115,00	21,06	136,06	56,67	158,50	18,96	234,13
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	18,19	21,67	50,00	0,87	115,00	21,70	136,70	56,67	161,44	18,21	236,32
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	17,42	22,29	52,00	0,91	115,00	22,33	137,33	56,67	164,01	17,44	238,12
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	16,63	22,89	54,00	0,94	115,00	22,92	137,92	56,67	166,22	16,65	239,54
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	15,82	23,45	56,00	0,98	115,00	23,49	138,49	56,67	168,07	15,84	240,58
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	14,99	23,99	58,00	1,01	115,00	24,03	139,03	56,67	169,56	15,01	241,24
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	14,15	24,50	60,00	1,05	115,00	24,54	139,54	56,67	170,70	14,17	241,54
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	13,28	24,98	62,00	1,08	115,00	25,02	140,02	56,67	171,50	13,30	241,47
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	12,40	25,43	64,00	1,12	115,00	25,47	140,47	56,67	171,97	12,42	241,06
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	11,51	25,85	66,00	1,15	115,00	25,88	140,88	56,67	172,11	11,52	240,30
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	10,60	26,23	68,00	1,19	115,00	26,27	141,27	56,67	171,94	10,61	239,22

g	n [°]	ω [rad/s]	r_g [m]	D [m]	R [m]	V_0 [m/s]	V_0 [m/s]-rid	v_{s0}	v_{y0}	ϑ [°]	ϑ [rad]	Hrot [m]	Yg [m]	Hg [m]	L_g [m]	Gmax [m]	Xg [m]	G_{TOT} [m]
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	9,68	26,59	70,00	1,22	115,00	26,62	141,62	56,67	171,46	9,69	237,82
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	8,74	26,91	72,00	1,26	115,00	26,95	141,95	56,67	170,70	8,76	236,12
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	7,80	27,20	74,00	1,29	115,00	27,24	142,24	56,67	169,65	7,81	234,13
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	6,84	27,45	76,00	1,33	115,00	27,49	142,49	56,67	168,34	6,85	231,86
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	5,88	27,67	78,00	1,36	115,00	27,71	142,71	56,67	166,78	5,89	229,34
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	4,91	27,86	80,00	1,40	115,00	27,90	142,90	56,67	164,98	4,92	226,57
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	3,94	28,02	82,00	1,43	115,00	28,06	143,06	56,67	162,96	3,94	223,57
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	2,96	28,14	84,00	1,47	115,00	28,18	143,18	56,67	160,73	2,96	220,36
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	1,97	28,22	86,00	1,50	115,00	28,26	143,26	56,67	158,31	1,98	216,95
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	0,99	28,27	88,00	1,54	115,00	28,32	143,32	56,67	155,71	0,99	213,36
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	0,00	28,29	90,00	1,57	115,00	28,33	143,33	56,67	152,94	0,00	209,60
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-0,99	28,27	92,00	1,61	115,00	28,32	143,32	56,67	150,01	-0,99	205,69
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-1,97	28,22	94,00	1,64	115,00	28,26	143,26	56,67	146,95	-1,98	201,64
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-2,96	28,14	96,00	1,68	115,00	28,18	143,18	56,67	143,77	-2,96	197,48
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-3,94	28,02	98,00	1,71	115,00	28,06	143,06	56,67	140,47	-3,94	193,20
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-4,91	27,86	100,00	1,75	115,00	27,90	142,90	56,67	137,08	-4,92	188,83
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-5,88	27,67	102,00	1,78	115,00	27,71	142,71	56,67	133,60	-5,89	184,37
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-6,84	27,45	104,00	1,82	115,00	27,49	142,49	56,67	130,04	-6,85	179,85
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-7,80	27,20	106,00	1,85	115,00	27,24	142,24	56,67	126,42	-7,81	175,27
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-8,74	26,91	108,00	1,88	115,00	26,95	141,95	56,67	122,74	-8,76	170,65
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-9,68	26,59	110,00	1,92	115,00	26,62	141,62	56,67	119,02	-9,69	165,99
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-10,60	26,23	112,00	1,95	115,00	26,27	141,27	56,67	115,26	-10,61	161,31
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-11,51	25,85	114,00	1,99	115,00	25,88	140,88	56,67	111,48	-11,52	156,62
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-12,40	25,43	116,00	2,02	115,00	25,47	140,47	56,67	107,67	-12,42	151,92
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-13,28	24,98	118,00	2,06	115,00	25,02	140,02	56,67	103,86	-13,30	147,23
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-14,15	24,50	120,00	2,09	115,00	24,54	139,54	56,67	100,04	-14,17	142,54
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-14,99	23,99	122,00	2,13	115,00	24,03	139,03	56,67	96,23	-15,01	137,88
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-15,82	23,45	124,00	2,16	115,00	23,49	138,49	56,67	92,42	-15,84	133,24
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-16,63	22,89	126,00	2,20	115,00	22,92	137,92	56,67	88,62	-16,65	128,63
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-17,42	22,29	128,00	2,23	115,00	22,33	137,33	56,67	84,84	-17,44	124,07
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-18,19	21,67	130,00	2,27	115,00	21,70	136,70	56,67	81,09	-18,21	119,54
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-18,93	21,02	132,00	2,30	115,00	21,06	136,06	56,67	77,36	-18,96	115,07
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-19,65	20,35	134,00	2,34	115,00	20,38	135,38	56,67	73,66	-19,68	110,64
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-20,35	19,65	136,00	2,37	115,00	19,68	134,68	56,67	69,99	-20,38	106,27
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-21,02	18,93	138,00	2,41	115,00	18,96	133,96	56,67	66,36	-21,06	101,97

g	n [/]	ω [rad/s]	r_g [m]	D [m]	R [m]	V_0 [m/s]	V_0 [m/s]-rid	v_{x0}	v_{y0}	ϑ [°]	ϑ [rad]	Hrot [m]	Yg [m]	Hg [m]	L_g [m]	Gmax [m]	Xg [m]	G_{TOT} [m]
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-21,67	18,19	140,00	2,44	115,00	18,21	133,21	56,67	62,76	-21,70	97,72
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-22,29	17,42	142,00	2,48	115,00	17,44	132,44	56,67	59,20	-22,33	93,54
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-22,89	16,63	144,00	2,51	115,00	16,65	131,65	56,67	55,69	-22,92	89,43
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-23,45	15,82	146,00	2,55	115,00	15,84	130,84	56,67	52,22	-23,49	85,39
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-23,99	14,99	148,00	2,58	115,00	15,01	130,01	56,67	48,79	-24,03	81,42
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-24,50	14,15	150,00	2,62	115,00	14,17	129,17	56,67	45,40	-24,54	77,53
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-24,98	13,28	152,00	2,65	115,00	13,30	128,30	56,67	42,06	-25,02	73,71
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-25,43	12,40	154,00	2,69	115,00	12,42	127,42	56,67	38,77	-25,47	69,97
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-25,85	11,51	156,00	2,72	115,00	11,52	126,52	56,67	35,52	-25,88	66,30
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-26,23	10,60	158,00	2,76	115,00	10,61	125,61	56,67	32,32	-26,27	62,72
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-26,59	9,68	160,00	2,79	115,00	9,69	124,69	56,67	29,16	-26,62	59,21
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-26,91	8,74	162,00	2,83	115,00	8,76	123,76	56,67	26,06	-26,95	55,78
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-27,20	7,80	164,00	2,86	115,00	7,81	122,81	56,67	22,99	-27,24	52,42
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-27,45	6,84	166,00	2,90	115,00	6,85	121,85	56,67	19,97	-27,49	49,15
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-27,67	5,88	168,00	2,93	115,00	5,89	120,89	56,67	16,99	-27,71	45,95
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-27,86	4,91	170,00	2,97	115,00	4,92	119,92	56,67	14,06	-27,90	42,82
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-28,02	3,94	172,00	3,00	115,00	3,94	118,94	56,67	11,17	-28,06	39,78
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-28,14	2,96	174,00	3,04	115,00	2,96	117,96	56,67	8,32	-28,18	36,81
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-28,22	1,97	176,00	3,07	115,00	1,98	116,98	56,67	5,51	-28,26	33,91
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-28,27	0,99	178,00	3,11	115,00	0,99	115,99	56,67	2,74	-28,32	31,09
-9,81	10,60	1,11	28,33	170,00	85,00	31,43	28,29	-28,29	0,00	180,00	3,14	115,00	0,00	115,00	56,67	0,00	-28,33	28,33



Dati di input calcolo AEROGENERATORE di riferimento:

D= 170 m;

Hmozzo=115 m;

rpm= 10,6

Lpala=83.0 m;

Gittata max., totale=241,5 m.

6.5 Frammento di 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. 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. 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

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].

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 di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di 2×10^{-5} .

6.6 Gittata massima del frammento di pala

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 190 m.

A 190 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 Standards II

7 CONCLUSIONI

Partendo dai dati degli aerogeneratori in merito alla velocità di rotazione (10,6 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 241,50 m per l'aerogeneratore "tipo" di progetto con diametro rotore pari a 170 m, altezza mozzo pari a 115 m e altezza totale pari a 200 m. Pertanto, la gittata massima calcolata garantisce la distanza di sicurezza sia dalla strada provinciale (SP62) che dalla provinciale (SR18) sia dai fabbricati, comunque tutti ruderi, presenti nell'area del parco.

Si sottolinea come, da dati messi a disposizione da fornitori di turbine eoliche, il calcolo rigoroso (paragrafo 5.2) porta a risultati meno cautelativi di quanto non lo siano quelli effettuati in questa sede.

Aerogeneratore	Distanza immobili [m]	Distanza viabilità	Gittata
CH01	399,4	519 m da SP62	241,5 m
CH02	475,02	459 m da SP62	241,5 m
CH03	>1000	945 m da SP42	241,5 m
CH04	>1000	820 m da SR18	241,5 m
CH05	>1000	267 m da SR18	241,5 m
CH06	>1000	265 m da SR18	241,5 m
CH07	>1000	282 m da SR18	241,5 m

Come visibile dalla tabella sopra riportata, la gittata è inferiore rispetto a tutte le distanze turbine/strade provinciali e turbine/fabbricati estrapolate dal layout dell'impianto eolico di Chelbi.