

REGIONE SICILIA

Provincia di Catania

COMUNI DI MILITELLO VAL DI CATANIA MINEO VIZZINI

PROGETTO

POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO-MILITELLO- VIZZINI



PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE



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

CODICE PROGETTISTA	DATA	SCALA	FOGLIO	FORMATO	CODICE DOCUMENTO				
					IMP..	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.
	20/02/2018	/	1/23	A4	MMV	ENG	REL	0019	00

NOME FILE: MMV-ENG-REL-0019_00.docx

ERG Wind Sicilia 2 S.r.l. e ERG Wind Sicilia 5 S.r.l. si riservano tutti i diritti su questo documento che non può essere riprodotto neppure parzialmente senza la sua autorizzazione scritta.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	2
MMV	ENG	REL	0019	00		

Storia delle revisioni del documento

REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	20/02/2018	Prima emissione	EG	MG	DG

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV		
MMV	ENG	REL	0019	00	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	3

INDICE

1	PREMESSA	4
2	STORICO DEGLI INCIDENTI	6
3	CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE	7
4	AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO	9
5	ROTTURA PALA	10
5.1	FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA.....	10
5.2	MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO	11
5.3	ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE	13
5.4	FRAMMENTO DI PALA	20
5.5	GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA	21
6	CONCLUSIONI	22

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	4
MMV	ENG	REL	0019	00		

1 PREMESSA

La società Hydro Engineering s.s. è stata incaricata di redigere il progetto definitivo relativo al potenziamento dell'esistente impianto eolico (composto da n. 59 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 0,85 MW, per una potenza complessiva di 50,15 MW), ubicato nei Comuni di Militello in Val di Catania, Vizzini e Mineo, tutti in Provincia di Catania. L'impianto esistente è attualmente in esercizio, giuste Concessioni edilizie rilasciate dai Comuni predetti. Il progetto definitivo consiste nello smantellamento dei n°59 aerogeneratori esistenti e la realizzazione di un impianto eolico composto da n°29 aerogeneratori, ciascuno dei quali di potenza massima pari a 4,2 MW, per una potenza complessiva di circa 120.00 MW. L'installazione del più moderno tipo di generatore comporterà la consistente riduzione del numero di torri eoliche, dalle 59 esistenti alle 29 proposte, riducendo l'impatto visivo, che talvolta può trasformarsi nel cosiddetto effetto selva. Inoltre, l'incremento di efficienza delle turbine odierne rispetto a quelle in esercizio, porterà ad un ampliamento del tempo di generazione ed un aumento della produzione unitaria media. La produzione di energia sarà incrementata sino a 3,8 volte quella attuale, e con la medesima proporzione avverrà l'abbattimento di produzione di CO2 equivalente.

Sulla base di quanto sopra e trattandosi di un progetto unitario la cui valutazione ambientale non può che essere svolta in maniera univoca e integrata, le Società ERG Wind Sicilia 5 Srl ed ERG Wind Sicilia 2 Srl sono le due Proponenti del progetto di integrale ricostruzione del parco esistente ed hanno pertanto presentato istanza a firma congiunta.

In particolare:

- o la società ERG Wind Sicilia 2 è titolare gli aerogeneratori ricadenti nel territorio del Comune di Vizzini;
- o la società ERG Wind Sicilia 5 è titolare gli aerogeneratori ricadenti nei territori dei Comuni di Mineo e Militello in Val di Catania.

Come per tutte le attività umane, esistono rischi legati alla esistenza e al funzionamento del parco eolico per coloro che abitano nelle immediate vicinanze. I rischi potenziali sono dovuti

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	5
MMV	ENG	REL	0019	00		

alla presenza di componenti pesanti e in movimento e alla vicinanza di linee elettriche in media tensione. 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 ciò che avviene nella realtà.

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

L'analisi è stata condotta per i seguenti casi:

- distacco di una pala 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.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	6
MMV	ENG	REL	0019	00		

2 STORICO DEGLI INCIDENTI

È da sottolineare comunque che nell'ultimo decennio, il tasso d'incidentalità 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, per una produzione complessiva 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.

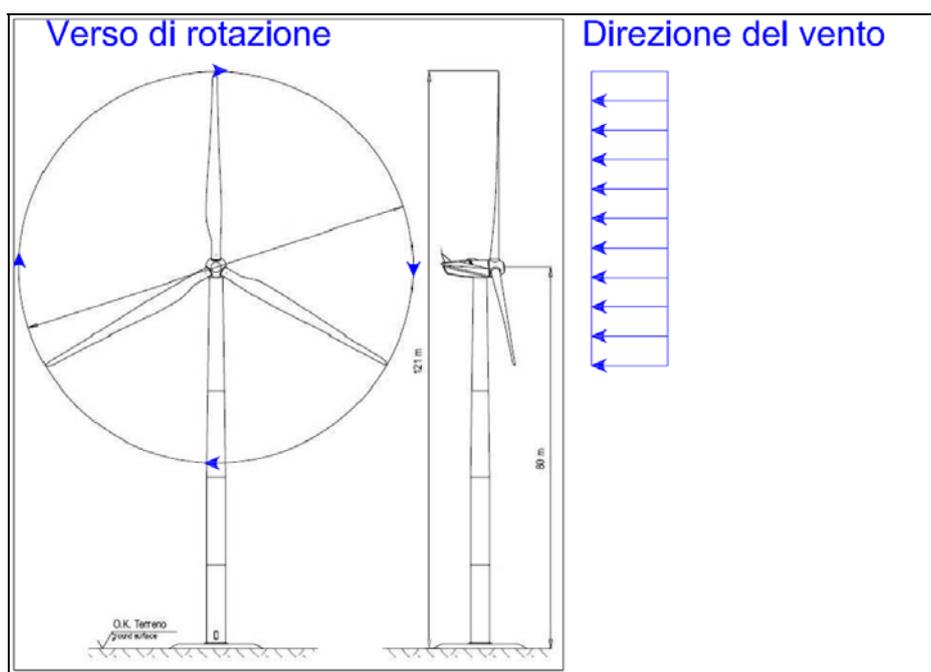
Un altro studio danese a partire da dati registrati su 120 mesi tra il 1993 e il 2003 in un parco di 1.912 impianti mostra una probabilità di distruzione di 0,00083 impianti per anno. In ambito rurale, la correlazione di questa statistica (6×10^{-5} /anno) con la probabilità di occupazione di un m² di terreno da parte di una persona individua una probabilità globale di ferire qualcuno molto bassa.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV.	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	7
MMV	ENG	REL	0019	00		

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.



Relazione tra direzione del vento e rotazione delle pale.

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

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	8
MMV	ENG	REL	0019	00		

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.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	9
MMV	ENG	REL	0019	00		

4 AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO

L'aerogeneratore tipo di riferimento avrà le seguenti caratteristiche:

ROTORE

- diametro 140m
- area spazzata 15386 m²
- velocità di rotazione 7-15 rpm
- numero pale 3

TORRE

- tipo: tubolare
- struttura: sezioni collegate tramite flangiatura
- altezza 112 m - 115 m

FUNZIONAMENTO

- cut-out 25 m/s (velocità del rotore gradualmente ridotta)
- Potenza massima 4.2 MW

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	10
MMV	ENG	REL	0019	00		

5 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.

5.1 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.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	11
MMV	ENG	REL	0019	00		

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:

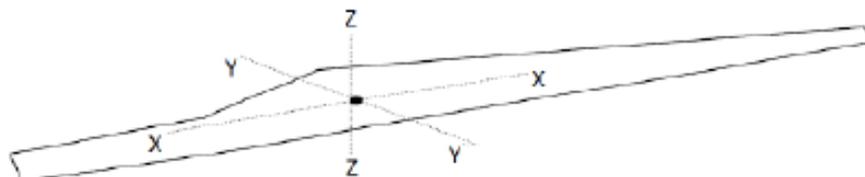
- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;
- dal tempo di volo.

5.2 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.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV.	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	12
MMV	ENG	REL	0019	00		



La rotazione della pala intorno all'asse zz è causato 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.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	13
MMV	ENG	REL	0019	00		

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.

5.3 ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE

La rottura della pala alla radice è un evento che storicamente è risultato frequente (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 può 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.

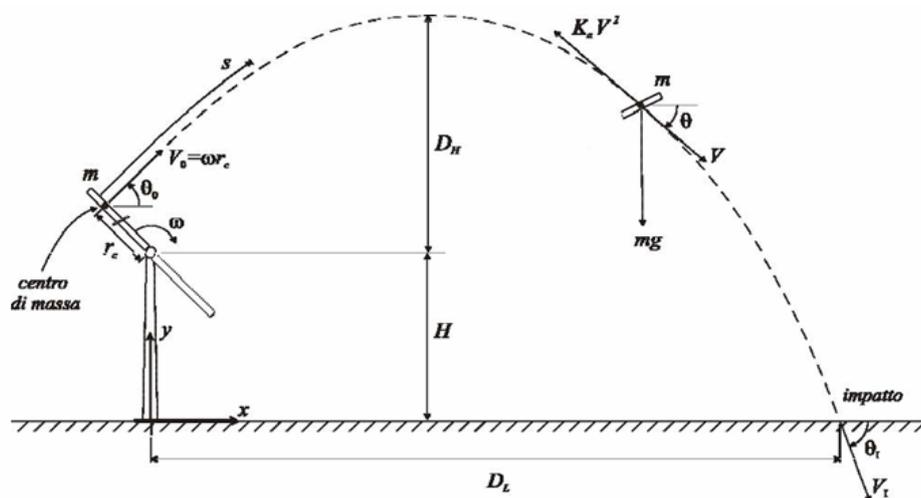
Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei bulloni stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei bulloni ed al distacco della pala.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV.	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	14
MMV	ENG	REL	0019	00		

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

$$x'' = 0$$

$$y'' = -g$$

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	15
MMV	ENG	REL	0019	00		

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 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 $r_g = 22.83 \text{ m}$ essendo il diametro del rotore $D = 140 \text{ m}$ ed il raggio di ciascuna pala $R = 68.5 \text{ m}$ circa.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	16
MMV	ENG	REL	0019	00		

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 10.5 giri/minuto. Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n/60 r_g = 25.09 \text{ m/sec}$$

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:

$$x_0 = -r_g \cos(\theta);$$

$$y_0 = H + r_g \sin(\theta);$$

$$v_x = V_g \sin(\theta);$$

$$v_y = V_g \cos(\theta).$$

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 (100 m). Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = X(t)$$

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

$$L = -r_g \cos(\theta) + V_g \sin(\theta)/g * [V_g \cos(\theta) + \sqrt{(V_g^2 \cos^2(\theta) + 2*(H + r_g \sin(\theta)) g)}];$$

Nella formula di L sopra riportata, si assumono i seguenti dati:

$$V_g = 25.09 \text{ m/s};$$

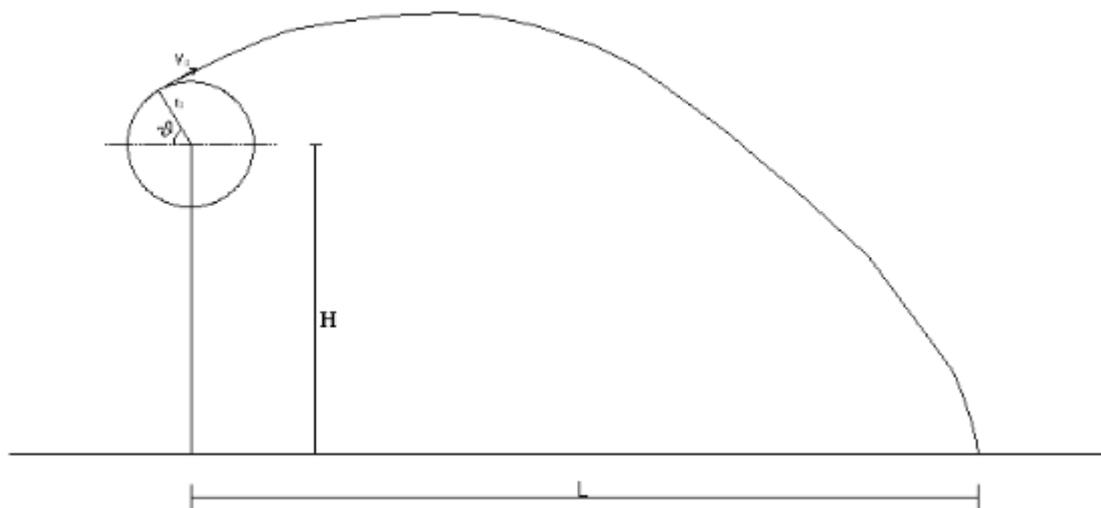
$$r_g = 22.83 \text{ m};$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2;$$

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

Il valore della gittata dipenderà dall'angolo θ .

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV.	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	17
MMV	ENG	REL	0019	00		



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 138.9 m circa con un angolo di distacco di circa $\vartheta = \pi/3$ rad. E più precisamente pari a 70° . A tale valore dovrà aggiungersi la distanza del vertice della pala dal baricentro, 45.67 m, per un valore complessivo della gittata: $L_{tot} = 184.91$ m.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO								PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI								18
MMV	ENG	REL	0019	00									

x_0 [m]	V_x [m/s]	y_0 [m]	V_y [m/s]	g [m/s ²]	n [/]	ω [rad/s]	r_g [m]	D [m]	R [m]	V_g [m/s]	H [m]	L(T) [m]	ϑ [°]	ϑ [rad]	$D_{bar/verticpala}$ [m]	L_{tot} [m]
-22,8	0,438	115,398	0,438	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,09017	115	-20,68	1	0,02	45,67	24,99
-22,7	2,187	116,990	24,995	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,09017	115	-5,13	5	0,09	45,67	40,54
-22,5	4,357	118,964	24,709	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	12,59	10	0,17	45,67	58,26
-22,1	6,494	120,909	24,235	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	30,00	15	0,26	45,67	75,67
-21,5	8,581	122,808	23,577	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	46,81	20	0,35	45,67	92,48
-20,7	10,604	124,648	22,739	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	62,72	25	0,44	45,67	108,39
-19,8	12,545	126,415	21,729	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	77,50	30	0,52	45,67	123,17
-18,7	14,391	128,095	20,553	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	90,93	35	0,61	45,67	136,60
-17,5	16,128	129,675	19,220	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	102,85	40	0,70	45,67	148,52
-16,1	17,741	131,143	17,741	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	113,13	45	0,79	45,67	158,80
-14,7	19,220	132,489	16,128	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	121,69	50	0,87	45,67	167,36
-13,1	20,553	133,701	14,391	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	128,52	55	0,96	45,67	174,19
-11,4	21,729	134,771	12,545	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	133,61	60	1,05	45,67	179,28
-9,6	22,739	135,691	10,604	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	137,03	65	1,13	45,67	182,70
-7,8	23,577	136,453	8,581	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	138,87	70	1,22	45,67	184,54
-5,9	24,235	137,052	6,494	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	139,24	75	1,31	45,67	184,91
-4,0	24,709	137,483	4,357	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	138,28	80	1,40	45,67	183,95
-2,0	24,995	137,743	2,187	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	136,15	85	1,48	45,67	181,82
0,0	25,090	137,830	0,000	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	133,00	90	1,57	45,67	178,67
2,0	24,995	137,743	-2,187	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	128,99	95	1,66	45,67	174,66
4,0	24,709	137,483	-4,357	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	124,27	100	1,75	45,67	169,94
5,9	24,235	137,052	-6,494	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	118,97	105	1,83	45,67	164,64
7,8	23,577	136,453	-8,581	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	113,24	110	1,92	45,67	158,91
9,6	22,739	135,691	-10,604	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	107,17	115	2,01	45,67	152,84
11,4	21,729	134,771	-12,545	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	100,87	120	2,09	45,67	146,54
13,1	20,553	133,701	-14,391	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	94,40	125	2,18	45,67	140,07
14,7	19,220	132,489	-16,128	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	87,85	130	2,27	45,67	133,52
16,1	17,741	131,143	-17,741	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	81,24	135	2,36	45,67	126,91
17,5	16,128	129,675	-19,220	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	74,63	140	2,44	45,67	120,30
18,7	14,391	128,095	-20,553	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	68,03	145	2,53	45,67	113,70
19,8	12,545	126,415	-21,729	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	61,47	150	2,62	45,67	107,14
20,7	10,604	124,648	-22,739	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	54,95	155	2,71	45,67	100,62
21,5	8,581	122,808	-23,577	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	48,46	160	2,79	45,67	94,13
22,1	6,494	120,909	-24,235	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	42,02	165	2,88	45,67	87,69
22,5	4,357	118,964	-24,709	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	35,61	170	2,97	45,67	81,28
22,7	2,187	116,990	-24,995	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	29,22	175	3,05	45,67	74,89
22,8	0,000	115,000	-25,090	9,81	10,50	1,10	22,83	140	68,5	25,090	115	22,83	180	3,14	45,67	68,50

CODICE COMMITENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	19
MMV	ENG	REL	0019	00		



Dati di input calcolo AEROGENERATORE di riferimento:

D= 140 m;

Hmozzo=115 m;

rpm= 11.9;

Lpala=68.5 m

Gittata max., totale=184.91 m

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	20
MMV	ENG	REL	0019	00		

5.4 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.



Esempio di rottura di pala senza distacco.

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 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

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].

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	21
MMV	ENG	REL	0019	00		

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} .

5.5 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

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	22
MMV	ENG	REL	0019	00		

6 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 184.91 m.

Pertanto, la gittata massima calcolata 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 5.2) porta a risultati meno cautelativi di quanto non lo siano quelli effettuati in questa sede.

AEROGENERATORE	DISTANZA PROVINCIALE [m]	DISTANZA IMMOBILI [m]
R-ML01	1860,13	>300
R-ML02	1316,08	>300
R-ML03	1150,38	>300
R-ML04	830,41	>300
R-ML05	407,46	>300
R-ML06	188	>300
R-ML07	323,88	>300
R-ML08	423,79	>300
R-ML09	408,8	254,53
R-ML10	451,75	>300
R-ML11	455,73	>300
R-VZ12	530,5	>300
R-VZ13	343,35	>300
R-VZ14	185	>300
R-VZ15	319,15	>300
R-VZ16	757,9	>300
R-VZ17	833,2	>300
R-VZ18	1066,34	>300
R-VZ19	1248,04	>300
R-VZ20	1268,77	>300
R-VZ21	839,2	>300
R-VZ22	613,44	>300
R-MI23	190	212,75
R-MI24	185	>300
R-MI25	227,22	200
R-MI26	232,06	>300
R-VZ27	609,86	>300
R-VZ28	422,11	>300
R-VZ29	290,86	>300

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV		
MMV	ENG	REL	0019	00	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO MINEO – MILITELLO - VIZZINI RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	23

Come visibile dalla tabella sopra riportata, la gittata di 184.91 m è inferiore rispetto a tutte le distanze turbine/strade provinciali e turbine/immobili estrapolate dal nuovo layout dell'impianto eolico di Militello-Mineo-Vizzini.