

				
COMUNE DI SEDINI	REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA	CITTA' METROPOLITANA DI SASSARI		
<p align="center">PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UNA SINGOLA TURBINA EOLICA DELLA POTENZA PARI A 975 kWp</p> <p align="center">Sito in Comune di Sedini (SS) – Loc. “Pedru Rui”</p>				
<p align="center">VALUTAZIONE IMPATTO AMBIENTALE Allegato B1 – DGR 45/24 del 27.9.2017</p>				
<p align="center">PROCEDURA P.A.U.R D.G.R. n. 11/75 del 24.03.2021 “Direttive regionali in materia di VIA e di provvedimento unico regionale in materia ambientale (PAUR)”</p>				
PROPONENTE:				
		EWT ITALIA DEVELOPMENT S.r.l. Via Giuseppe Rovani, 7 20123 Milano (MI) P. IVA 10525690961 ewtitaliadevelopmentesrl@pecimprese.it		
TITOLO ELABORATO:		CODICI ELABORATO:		
Relazione gittata frammento pala		R06		
SCALA / FORMATO	DATA EMISSIONE:	GTT		
Relazione (f.to) A4	15 luglio 2023	PD0030-SDN.PRO.REL.R06 rev. CdS		
SOCIETA' COMMITTENTE		SOCIETA' DI SVILUPPO PROGETTO EMAN S.r.l. Sviluppo Energie Rinnovabili Sede Operativa Sardegna: Via Corradino, 53 – 09016 Iglesias (SU) P.I. IT 11439230019 Mail technical@emansrl.it – PEC eman.srl@pec.it		
EWT ITALIA DEVELOPMENT S.R.L.				
Responsabile Committenza Marco Sorbini	Responsabile Elaborato Ing. Marco Pisano			
Progettazione Definitiva	Estensori SIA			
Project Manager Alberto Laudadio	Dott. Geol. Annalisa Ruggia	N°	DATA	DESCRIZIONE
Ing. Andrea Ortolani	Dott. Francesco Lecis	01	15 luglio 2023	EMISSIONE
Geom. Alberto Cosso	Dott. Fabrizio Vinci	02	15 luglio 2023	REVISIONE CdS
Ing. Marco Pisano	Dott. Ermanno Pidinchiedda			
Ing. Gabriella Di Quattro	Dott. Claudia Carente			
Ing. Gianluca Cadeddu				

Sommario

1	Cenni sui Principi di Funzionamento di un Aerogeneratore.....	2
2	Rottura della pala del rotore	3
2.1	Gittata, analisi teorica.....	3
2.2	Caratteristiche Turbina	5
2.3	Ipotesi di Calcolo	5
2.4	Calcolo della Gittata massima.....	7
3	Rottura di un frammento di pala	9
3.1	Pure javeling (moto del giavellotto)	10
3.2	Complex rotation (rotazione complessa del corpo rigido)	12
3.3	Applicazione del Moto di Rotazione Complessa	13
4	Conclusioni	15

CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA IN CASO DI ROTTURA DELLA PALA DI ROTORE E DI UN FRAMMENTO DI PALA DI UN AEROGENERATORE

1 Cenni sui Principi di Funzionamento di un Aerogeneratore

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

L'albero lento è, nella maggior parte dei casi, collegato ad un moltiplicatore di giri, da cui si diparte un albero veloce, che ruota con velocità angolare data da quella dell'albero lento per il rapporto di trasmissione del rotismo installato. 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.

Oltre ai componenti su elencati, vi è un sistema di controllo che esegue, il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, il controllo dell'orientamento della navicella, detto controllo dell'imbardata, che serve ad allineare la macchina rispetto alla direzione del vento. Si riporta di seguito una figura che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento che causa tale moto. 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.

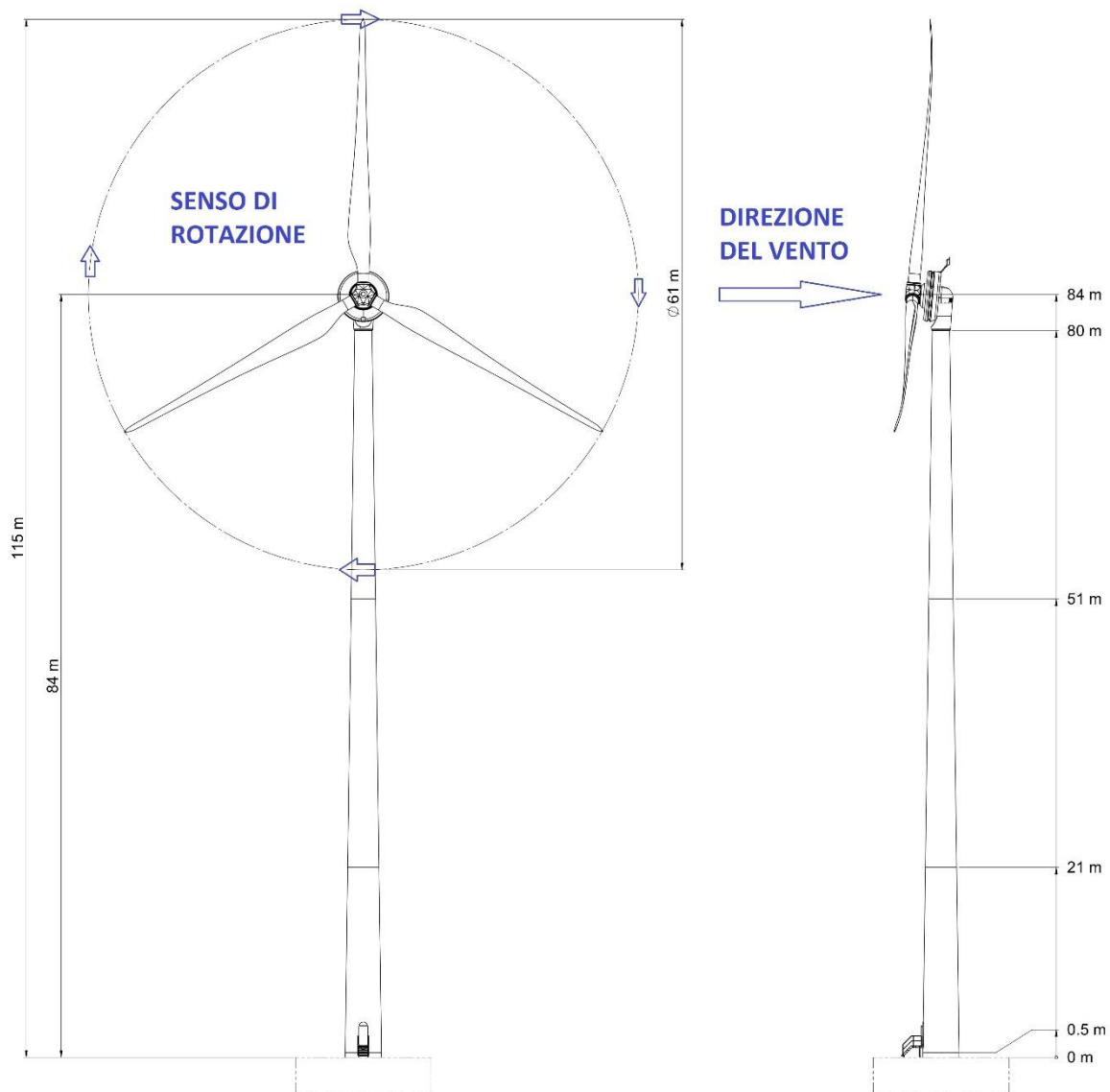


Figura: Relazione tra le direzioni del vento ed il verso di rotazione del rotore

2 Rottura della pala del rotore

2.1 Gittata, analisi teorica

Il calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'Aerogeneratore segue il principio della balistica applicata ai moto dei proiettili.

Si evidenzia che i calcoli sono fatti considerando nullo l'attrito con l'aria.

L'analisi quantitativa del moto di un organo rotante (o di una sua parte), che si distacca accidentalmente risulta molto complesso, implicando la conoscenza oltre che dei dati tecnici e cinematici dell'aerogeneratore, la conoscenza del campo di moto dell'area che circonda l'aerogeneratore; infatti, sarebbe necessario conoscere valori di velocità (in termini vettoriali), di temperatura, di pressione di

un volume significativo di atmosfera (all'interno del quale è immerso l'aerogeneratore) e le leggi orarie che ne definiscono le variazioni.

A complicare la modellazione si aggiunge la condizione che il regime di moto delle masse d'aria (fenomeno ventoso) è assai spesso di tipo turbolento e la geometria dei componenti che teoricamente possono distaccarsi (pale) hanno profili aerodinamici che esaltano i fenomeni di portanza e deportanza. Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala o la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello "Moto rotazionale complesso" che permette di studiare il moto nel suo insieme, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx , yy , zz .

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.

Studi teorici che tengono conto di questi parametri, eseguiti per conto di società produttrici di aerogeneratori eolici, hanno evidenziato che:

- se si effettua un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale si ottengono 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 principalmente dalla velocità di rotazione.

Nei paragrafi successivi si effettuerà il calcolo della gittata per l'aerogeneratore in progetto, considerando solo parametri geometrici e cinematici e non l'effettivo moto rotazionale complesso, e pertanto otterremo valori della gittata sicuramente superiori rispetto a quelli reali.

2.2 Caratteristiche Turbina

Le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore, intese come grandezze geometriche e valori cinematici di funzionamento, influenzano in maniera determinante i valori di gittata riscontrabili in caso di distacco accidentale degli elementi rotanti.

Il presente studio prende in esame l'aerogeneratore DIRECTWIND 61 prodotto dall'azienda olandese Emergya Wind Technologies BV, costituito da un aerogeneratore ad asse orizzontale tripala con torre troncoconica, e i relativi dati sono nell'elaborato tecnico che descrive la turbina EL.S247.R01.c.

Tra le diverse configurazioni dell'aerogeneratore si prenderà in esame quella avente valori dimensionali più elevati, pertanto sarà analizzata la configurazione avente le seguenti caratteristiche:

- Altezza al mozzo (H) = 84 m
- Diametro rotore (D) = 60,9 m
- Velocità massima di rotazione rotorica = 29,1 rpm.

2.3 Ipotesi di Calcolo

Come d'innanzi specificato, si procede nel calcolo della gittata massima del generico frammento di ala considerando la traiettoria a giavellotto con minore resistenza aerodinamica, con traiettoria del frammento complanare al rotore, tali ipotesi risultano cautelative ai fini della verifica dell'area potenzialmente raggiungibile da un frammento distaccatosi accidentalmente garantendo così un ulteriore margine di sicurezza.

➤ Geometria del problema e calcolo della gittata

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

$$\ddot{x} = 0$$

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

Dove $g=9.82 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità. La legge del moto che costituisce soluzione di queste equazioni è:

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

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

Dove $(x_0$ e $y_0)$ è la posizione iniziale del punto materiale, e $(v_x$ e $v_y)$ 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:

$$T = v_y/g + 1/g \sqrt{v_y^2 + 2y_0g}$$

in cui è stata scartata la soluzione corrispondente a tempi negativi.

La posizione e la velocità iniziale sono determinate dall'angolo θ e dalla velocità iniziale V del frammento di pala al momento del distacco. Esse sono legate alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$X_0 = R \cos \theta$$

$$Y_0 = H + R \sin \theta$$

$$V_x = V \sin \theta$$

$$V_y = V \cos \theta$$

La gittata L è la distanza dal palo del punto di impatto al suolo del frammento di pala.

Dalla legge del moto si ottiene:

$$L = X(T)$$

Sostituendo l'espressione per T ricavato sopra, si ricava la gittata L in funzione di V e di θ :

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

Come si evincerà dai risultati numerici riportati nel seguito, la massima gittata non si avrà per $\theta=45^\circ$, in quanto il corpo nell'istante del distacco si trova già in un punto definito dello spazio (diverso dal punto (0,0)) dipendente dall'altezza dell'aerogeneratore, dal valore dell'angolo nell'istante del distacco e dalla posizione del baricentro della pala distaccatasi rispetto al centro dell'aerogeneratore (R).

2.4 Calcolo della Gittata massima

Come già precedentemente indicato, il calcolo della gittata massima richiede la conoscenza dei valori H (altezza del mozzo), D (diametro del rotore) e V (velocità di distacco del frammento di pala). Il massimo numero di giri per minuto che l'aerogeneratore è in grado di raggiungere è pari a 29,1 rpm.

Quindi supponendo che la rottura della pala avvenga vicino al mozzo e considerando $R=29,15/3 = 9,72$ (posizione baricentro pala = lunghezza pala/3), tenendo conto che i valori di H ed D sono rispettivamente $H=84\text{m}$ ed $D=60,9$ il calcolo della velocità di distacco del frammento di pala si ottiene tramite la seguente relazione cinematica:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \text{rpm} / 60$$

si ottiene una velocità di distacco di circa 29.6 m/s.

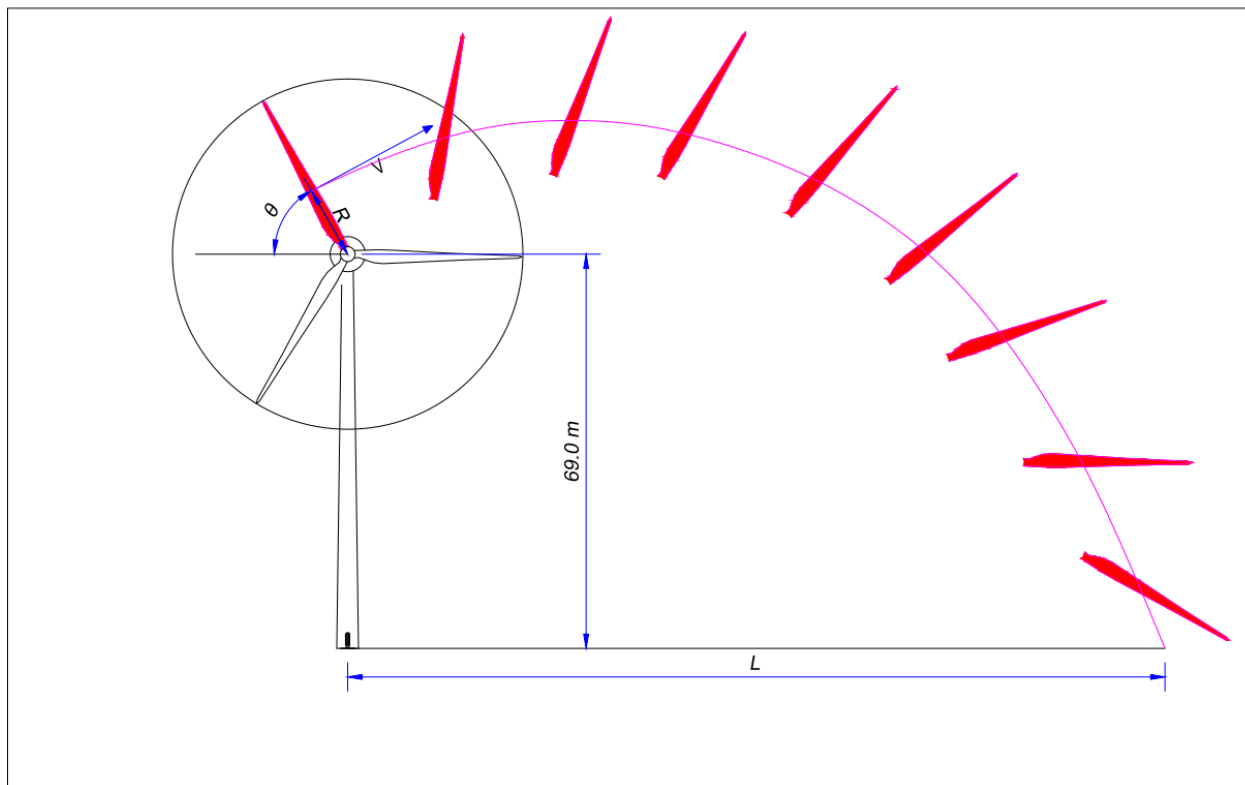
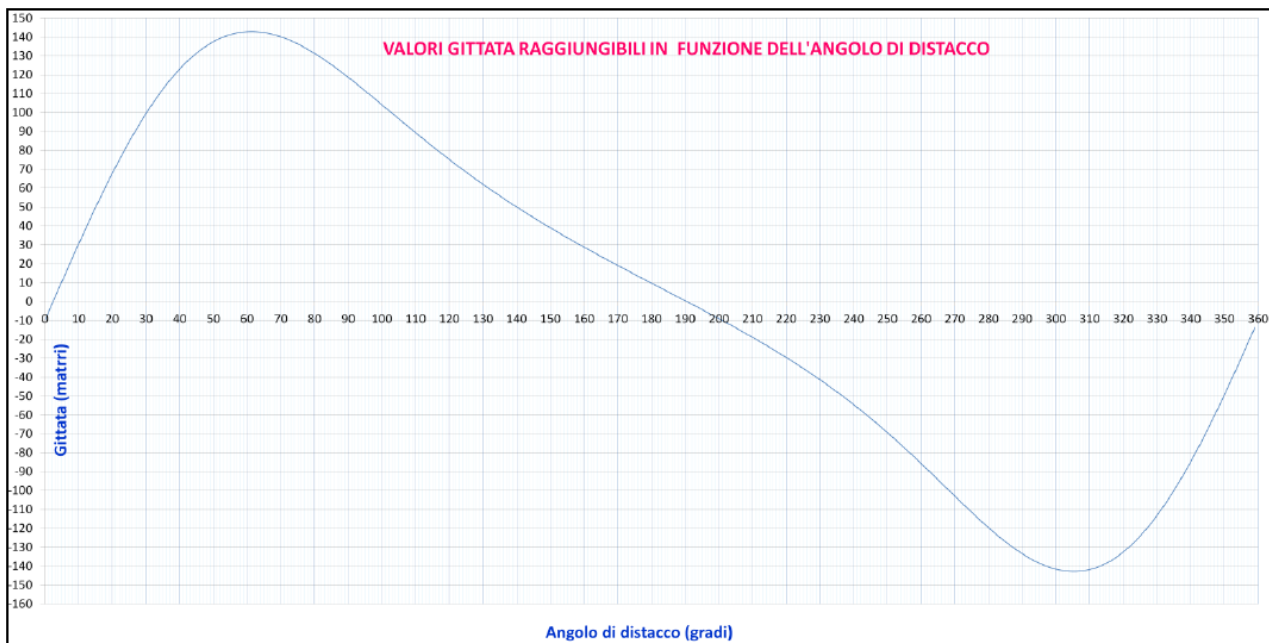


Figura: Geometria del modello di calcolo

Di seguito si riporta il grafico della gittata in funzione dell'angolo e della velocità di distacco. Nel grafico si propone la gittata massima nel caso in cui si distacchi l'intera pala dal mozzo con una velocità di 29.6 m/s, che costituisce la massima velocità raggiunta dal baricentro della pala allorquando il rotore compie 29.1 rivoluzioni per minuto.

La gittata massima raggiungibile è di circa **170 m** in corrispondenza dell'angolo di distacco pari a 61° . Il valore ricavato è sicuramente compatibile con quello degli studi forniti dalle ditte produttrici.



Le ipotesi alla base del calcolo hanno permesso di semplificare la trattazione numerica, tali semplificazioni si bilanciano reciprocamente infatti, se da una parte le forze aerodinamiche di portanza che possono innescarsi sul frammento di pala potrebbe prolungare il volo e allungare la distanza percorsa, la presenza dell'aria, d'altra parte, genera delle forze di resistenza viscosa che agendo sulla superficie del frammento ne riducono tempo di volo e distanza, inoltre la complessità del moto rotazionale, ovvero la rotazione della pala durante il moto di caduta, rappresenta una condizione reale che attenua i valori della gittata massima.

Inoltre c'è da considerare che i valori di gittata calcolati sono stati ottenuti considerando tutte le condizioni più gravose al momento dell'ipotetica rottura, come ad esempio:

- massimo numero di giri del rotore;
- inclinazione della pala corrispondente alla massima velocità.

Dalle considerazioni d'innanzi esposte unitamente alle costatazioni derivanti da eventi reali si può senz'altro affermare, che il valore della gittata massimo ottenuto dal calcolo paria a **L = 170 m** in corrispondenza di un angolo di distacco pari a $\theta = 61^\circ$ rappresenta un valore conservativo della distanza raggiungibile da un elemento rotante (o parte di esso) distaccatosi accidentalmente dall'aerogeneratore in condizioni di piena operatività.

3 Rottura di un frammento di pala

Uno dei pochi riferimenti tecnici per questa analisi, e quindi l'unico documento ad oggi commissionato e redatto da una casa costruttrice di aerogeneratori, è lo studio condotto da un ente scientifico di ricerca certificato: la BP Power. Questo ente ha eseguito su commissione della Vestas (casa produttrice danese) un calcolo molto accurato e pubblicato con il titolo "**Blade throw calculation under normal operative condition V80 2MW**". Lo scopo della seguente trattazione è quello di quantificare la gittata adottando un approccio computazionale con calcolo di tipo balistico.

Lo studio della BP considera il calcolo della gittata non solo per l'intera pala bensì per frammenti della lunghezza di 5 e 10 metri che si staccano dalla struttura dell'aerogeneratore nell'ipotesi che la rottura avvenga in modo fragile e nell'ipotesi che i sistemi di controllo quali freno aerodinamico e sistema parafulmine siano completamente fuori servizio.

Il calcolo elaborato da BP Power, è relativo all'aerogeneratore tipo Vestas V80.

La quantificazione della gittata è stato implementato assumendo due differenti moti del corpo della pala:

- **Pure javeling (moto del giavellotto)**
- **Complex rotation (rotazione complessa del corpo rigido) basandosi sulle seguenti ipotesi:**

1. Il distacco della pala, e quindi la gittata, è funzione dell'angolo che l'asse della pala forma con l'orizzontale; nel presente studio si ipotizza che la rottura della pala o dei suoi frammenti avvenga in corrispondenza di un angolo di 45°.
2. La gittata risulta incrementata, in termini di lunghezza e del tempo di volo, in quanto la pala, in virtù della sua aerodinamicità, è sostenuta da un'azione di portanza;
3. la gittata (vectorial distance) è data dalla somma vettoriale delle proiezioni sul piano entro il quale giace l'asse del mozzo di due vettori definite nello studio in-plane ed out-plane;
4. La velocità di rotazione adottata nel calcolo è di 20 rpm quindi la velocità di distacco, che agisce nel piano (in-plane) dove giace l'asse della torre, è direttamente correlata ad essa mediante la formula $V = \omega * r$ (definita V_0 nel calcolo dei wtg del parco di cui all'oggetto);
5. A favore di sicurezza, e quindi al fine di ottenere la massima distanza possibile fuori piano, si è considerata una velocità del vento al momento del distacco che agisce ortogonalmente all'asse del mozzo con intensità di 25 m/sec quindi l'altra componente vettoriale della gittata, ovvero la distanza al di fuori del piano (out-plane), oltre a dipendere dalla forza dell'attrito dell'aria, è funzione diretta della velocità del vento anzidetta;
6. Si è considerata esclusivamente la componente della forza di resistenza aerodinamica dovuta alla particolare forma della singola pala agente nel piano orizzontale;

7. si ipotizza che la sezione di distacco della pala dal resto della struttura sia netta, ovvero che la rottura avvenga in modo fragile senza considerare l'effettiva struttura fibrosa e filamentosa del corpo della pala, immersa in una matrice di resina epossidica.

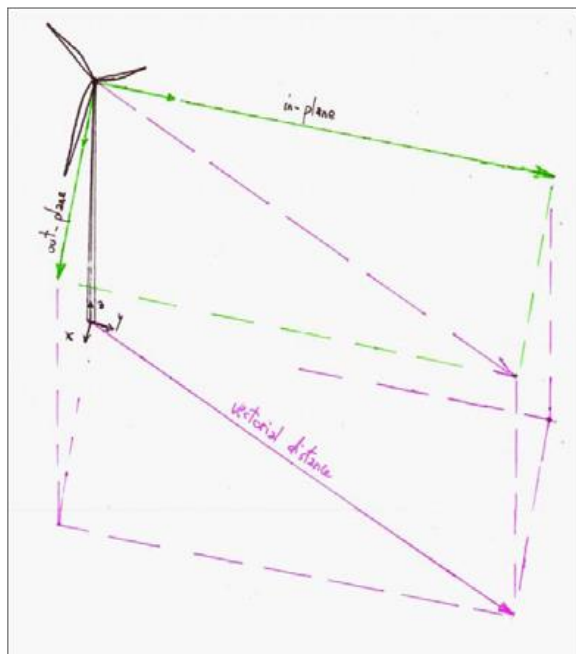


Figura: Sistema di riferimento tridimensionale adottato nello studio della BP Power.

La prima considerazione da fare è che il calcolo è stato eseguito in maniera molto approfondita, considerando i diversi aspetti fisici ed è stato svolto con molto rigore, tuttavia nella realtà il verificarsi sia delle ipotesi sia delle cause che portano ai risultati evidenziati nelle tabelle precedenti sono rappresentati da indici di probabilità irrealizzabili;

3.1 *Pure javeling (moto del giavellotto)*

Il moto definito nella relazione di Vestas "Pure javeling" e dagli stessi autori considerato estremamente improbabile; rappresenta un mero esercizio matematico. Data la forma e la distribuzione dei pesi della pala o parte di essa, per quanto attiene allo studio del moto, questa può essere considerata inizialmente come un corpo rigido esteso "vincolato" (in quanto soggetto al momento delle reazioni del mozzo) che compie una completa rotazione intorno ad esso con una data velocità angolare ω . Se supponiamo che all'istante t_0 avvenga il distacco della pala o parte di essa, al tempo t ($t_0 + \Delta t$) lo stesso corpo diviene un corpo esteso "libero" di muoversi, non essendo più soggetto a forze esterne in grado di variare il momento angolare (reazioni del mozzo); pertanto la pala o parte di essa conserva il moto di rotazione che aveva all'istante t_0 , vale a dire che si mette a ruotare intorno ad un suo asse principale d'inerzia. Infatti le forze di resistenza del mezzo (che pure sono forze esterne) non vanno ad agire sul moto di rotazione del corpo ma hanno soltanto l'effetto di smorzare la velocità di rotazione e nel caso in esame

di incurvarne la traiettoria. Tutto questo implica che il moto del giavellotto, applicato al caso in questione risulta fisicamente improbabile, perché diverse sono le condizioni iniziali da cui si parte per lo studio del fenomeno.

Difatti nello studio è riportata in grassetto la seguente affermazione che si cita testualmente. *“Esperienze basate su dati reali (su una casistica di 1578 casi) fino all’agosto del 2006 hanno dimostrato che nel caso di distacco della pala o parti di essa l’unico moto che si è registrato è stato un moto di completa rotazione e che le distanze percorse lungo il moto sono risultate sempre inferiori alle lunghezze riportate nella relazione. Il distacco delle parti, in genere piccole, dovuto a guasti causati da eventi eccezionali (quali la straordinaria energia prodotta da un fulmine) ha portato nel peggiore dei casi, a ritrovare le parti stesse a distanze non superiori ai 40-50 metri dalla base della torre.”* In realtà già questo basterebbe ad escludere il verificarsi del moto di *“Pure javeling”*.

Tale moto porta al seguente risultato:

BLADE THROW CALCULATION UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS V80 – 2MW

Case 1	5m blade section	10m blade section	Whole blade
	For Drag IPA= 0.10 m ² IPCD=OPCD=2 OPA=2.52m ²	For Drag IPA= 0.24 m ² IPCD=OPCD=2 OPA=9.79m ²	For Drag IPA= 2.38 m ² IPCD=OPCD=2 OPA=81.46m ²
Rotorspeed = 20 rpm			
Flight Time	12.64	11.64	6.27
In-plane distance (m)	468.6	460.4	104.4
Outplane distance (m)	251.8	225.6	80.1
Vectorial distance (m)	531.9	512.7	131.6

Case 2b	5m blade section	10m blade section	Whole blade
	For Drag IPA= 0.10 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=2.52 m ²	For Drag IPA= 0.24 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=9.79m ²	For Drag IPA= 2.38 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=81.46 m ²
Rotorspeed = 20 rpm			
Flight Time	13.23	12.17	6.49
In-plane distance (m)	484.2	476.5	107.6
Outplane distance (m)	99.1	81.9	14.2
Vectorial distance (m)	494.3	483.5	108.6

Case 2c	5m blade section	10m blade section	Whole blade
	For Drag IPA= 0.10 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=2.52 m ²	For Drag IPA= 0.24 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=9.79m ²	For Drag IPA= 2.38 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=81.46 m ²
Rotorspeed = 20 rpm			
Flight Time	13.88	12.76	6.74
In-plane distance (m)	499.5	495.5	112.5
Outplane distance (m)	106.5	88.7	15.5
Vectorial distance (m)	510.8	503.4	113.5

Tabella: Moto del giavellotto

Nella descrizione di questo fenomeno la velocità di rotazione della pala considerata è di 20 rpm. Il valore maggiorato viene giustificato da un eventuale effetto di sovra portanza al momento del distacco; in realtà le macchine eoliche raggiungono la massima velocità di rotazione già a velocità inferiori ai 15 m/s, e per velocità superiori cominciano ad entrare in funzione una serie di controlli elettronici sul movimento del Pitch, al fine di ridurre i carichi sulle fondazioni, e per prevenire eventuali raffiche che comportano prolungati fermo-macchina, quindi paradossalmente per velocità del vento superiori ai 15 m/s difficilmente si supera il valore di velocità di rotazione statica del rotore pari in questo caso a 16,0 rpm; (N.B i giri al minuto sono il parametro che più influenza la distanza di gittata nel piano in cui giace il rotore).

La stessa considerazione vale per il caso estremo considerato di velocità max pari a 25 m/s, è questa una condizione in cui è veramente improbabile che il rotore giri a 20 rpm.

L'aspetto fondamentale da evidenziare è che se è vero che ognuno dei parametri utilizzati nello studio (rpmmax, Vmax, forze di spinta) è realizzabile anche se poco probabile, è assolutamente improbabile la simultaneità di tali valori.

In base a quanto detto, il moto di *pure javeling*, resta escluso, pertanto la tabella 1 è assolutamente solo un modello matematico.

3.2 *Complex rotation (rotazione complessa del corpo rigido)*

L'unico moto che ha valore reale è un moto di completa rotazione; in base a quanto detto si considerano come reali i valori della tabella n. 2. Inoltre in questo moto i valori della distanza vettoriale, sono estremamente improbabili, in quanto non è stato considerato che alcun sistema di controllo e di sicurezza dell'aerogeneratore.

Case 3a	5m blade section	10m blade section	Whole blade
	For Drag IPA= 1.26 m ² IPCD=0.5 OPCD=0.5 OPA=1.26 m ²	For Drag IPA= 4.9 m ² IPCD=0.5 OPCD=0.5 OPA=4.9m ²	For Drag IPA= 40.73 m ² IPCD=0.5 OPCD=0.5 OPA=40.73 m ²
Rotorspeed = 20 rpm			
Flight Time	13.88	12.76	6.74
In-plane distance (m)	316.3	296.4	103.8
Outplane distance (m)	143.1	121.2	24.0
Vectorial distance (m)	347.2	320.2	106.5

Case 3b	5m blade section	10m blade section	Whole blade
	For Drag IPA= 1.26 m ² IPCD=1 OPCD=1 OPA=1.26 m ²	For Drag IPA= 4.9 m ² IPCD=1 OPCD=1 OPA=4.9m ²	For Drag IPA= 40.73 m ² IPCD=1 OPCD=1 OPA=40.73 m ²
Rotorspeed = 20 rpm			
Flight Time	13.88	12.76	6.74
In-plane distance (m)	216.6	208.5	94.6
Outplane distance (m)	195.2	189.2	41.0
Vectorial distance (m)	291.6	268.5	103.1

Case 3c	5m blade section	10m blade section	Whole blade
	For Drag IPA= 1.26 m ² IPCD=1.5 OPCD=1.5 OPA=1.26 m ²	For Drag IPA= 4.9 m ² IPCD=1.5 OPCD=1.5 OPA=4.9m ²	For Drag IPA= 40.73 m ² IPCD=1.5 OPCD=1.5 OPA=40.73 m ²
Rotorspeed = 20 rpm			
Flight Time	13.88	12.76	6.74
In-plane distance (m)	168.2	164.2	87.3
Outplane distance (m)	223.8	196.3	53.7
Vectorial distance (m)	280.0	256.0	102.5

Tabella: Moto di rotazione complessa

3.3 Applicazione del Moto di Rotazione Complessa

Il seguente calcolo è stato condotto considerando sia le differenze geometriche sia di concezione costruttiva che l'aerogeneratore di progetto presenta rispetto a quelli della Vestas con ipotesi di rottura di mezza pala.

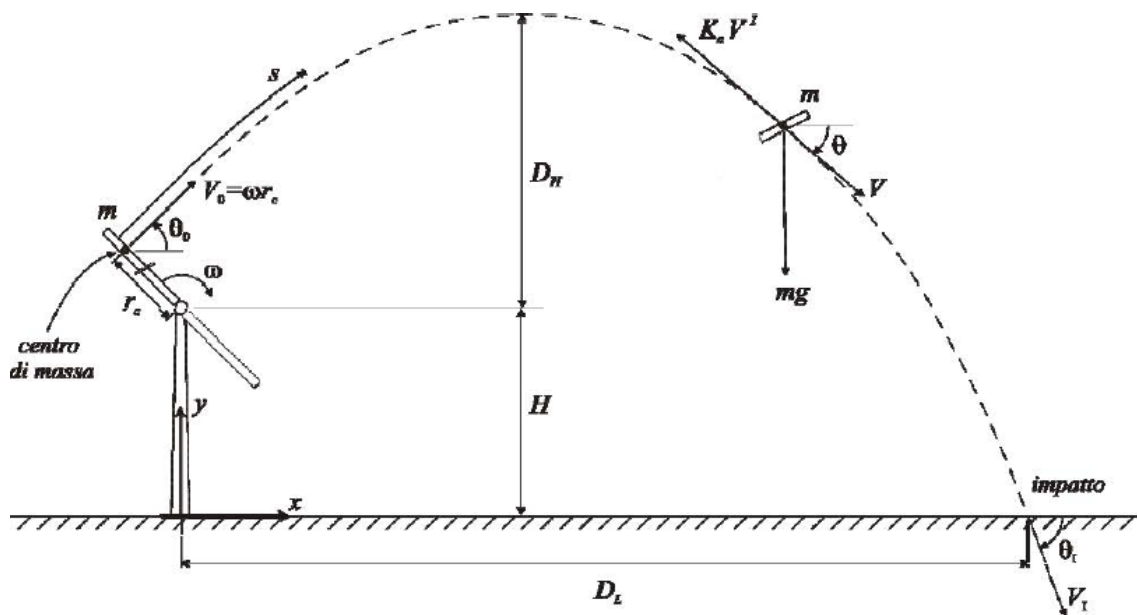


Figura: Vista frontale dell'aerogeneratore e della traiettoria di un frammento di pala espulso

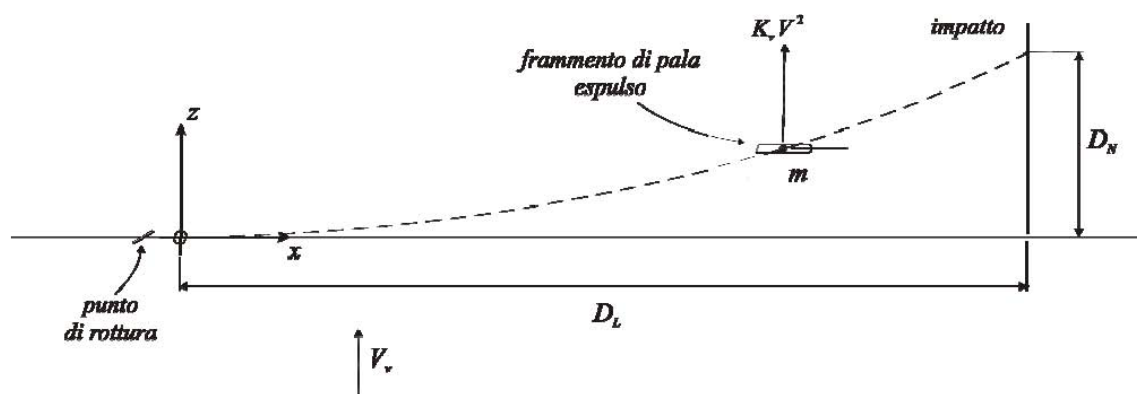


Figura: Vista aerea dell'aerogeneratore e della traiettoria di un frammento di pala espulso

Preme sottolineare che i dati riportati in tabella costituiscono dati altamente cautelativi per l'aerogeneratore in progetto. Infatti l'aerogeneratore di progetto è il modello EWT DW61 che presenta un diametro di 61 m, quindi di dimensioni inferiori al diametro della V80 pari a 80m. Proprio per la minor dimensione del diametro, la EWT presenta una velocità di rotazione nominale più alta rispetto alla V80. Da sottolineare che la turbina in progetto però è prodotta con una tecnologia più moderna che ha consentito di ridurre il peso della singola pala.

Di conseguenza considerando i risultati esposti per la V80 ed adottandoli per la EWT si sovradimensiona appena la reale gittata della pala/ sezione-di-pala in caso di distacco agli ingombri della EWT, mozzo Hub 84 m e diametro \varnothing rotore 61 m.

E' ovvio che adottando i dati della gittata relativi all'aerogeneratore Vestas V80 ci si muove in un regime fortemente cautelativo. Volendo dedurre dei risultati più reali per l'aerogeneratore EWT di progetto, restando comunque in regime cautelativo, vale a dire considerando una velocità di rotazione di circa 18 rpm a garanzia di un margine di oltre il 5% che tenga conto di eventuali transitori dovuti allo slittamento

del generatore ed agli effetti del sistema di pendenza, si può affermare che i dati riportati nelle tabelle di cui sopra possano essere ridotti senza commettere errore di sottostima di almeno il 5-10%.

4 Conclusioni

Riportando ancora una volta quanto scritto dalla BP POWER nel “**Blade throw calculation under normal operating**” “esperienze basate su dati reali (su una casistica di 1578 casi) fino all’agosto del 2006 hanno dimostrato che nel caso di distacco della pala o parti di essa l’unico moto che si è registrato è stato un moto di completa rotazione e che le distanze percorse lungo il moto sono risultate sempre inferiori alle lunghezze riportate nella relazione.

Il distacco delle parti dovuto a guasti causati da eventi eccezionali (quali la straordinaria energia prodotta da un fulmine) ha portato nel peggiore dei casi, a ritrovare le parti stesse a distanze non superiori ai 40-50 metri dalla base della torre.” Ponendoci nella condizione peggiore che un frammento o l’intera pala si staccasse dal mozzo, si è dimostrato che l’impatto della stessa avviene a distanze molto contenute.

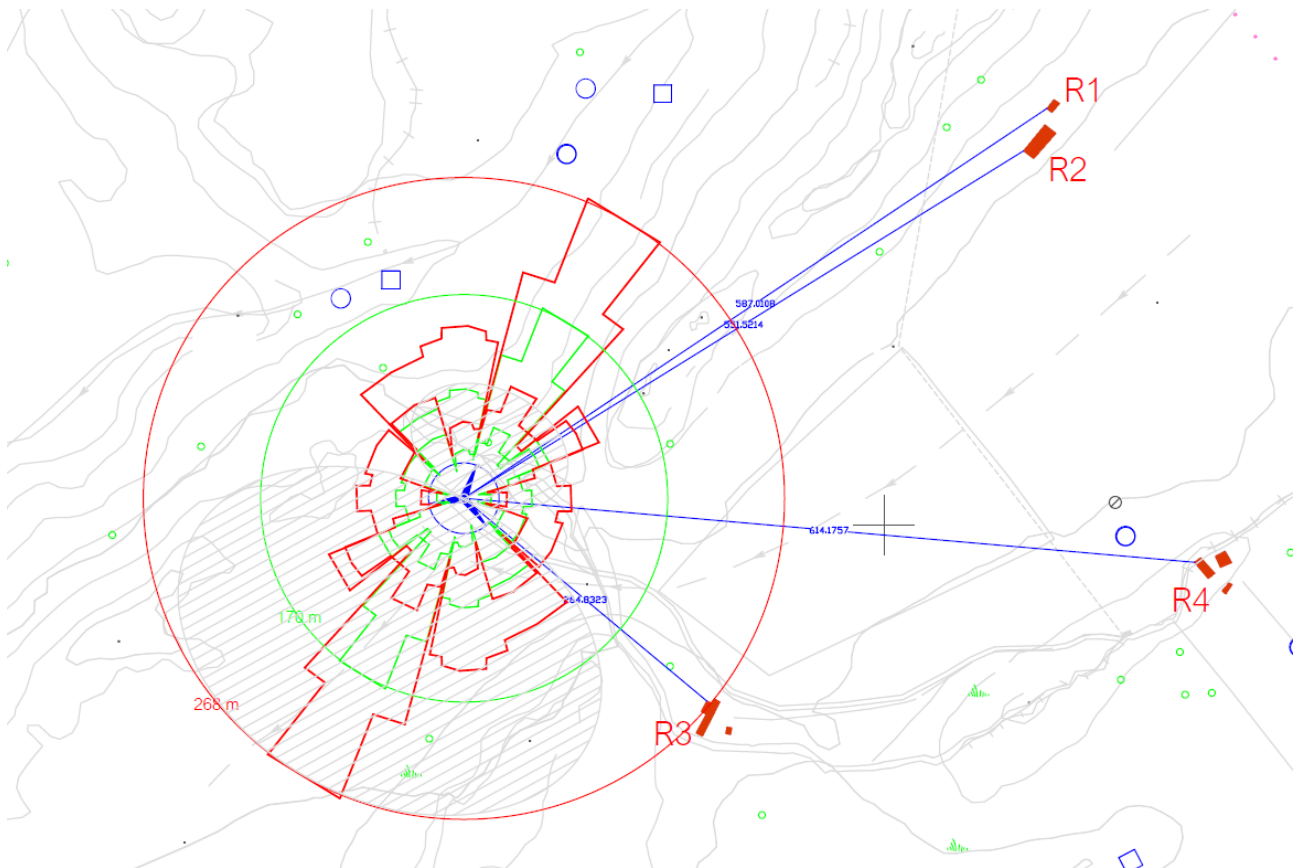
Infatti, nel caso si staccasse l’intera pala, il suo valore massimo di gittata sarebbe di **170 mt**, alla velocità massima di rotazione, nella trasversale della direzione prevalente di vento e trascurando l’attrito dell’aria.

Nel caso di rottura di un frammento di pala, per il quale vigono solo calcoli di tipo probabilistico, come anche menzionato dallo studio della BP POWER, ipotizzando di metterci nelle condizioni di massima rotazione si ha un valore di gittata pari a **268,15 mt** per un frammento pari a 2/3 della pala. Si tenga presente che tale valore nella realtà risulterebbe inferiore; difatti è giusto considerare che agiscano simultaneamente le condizioni peggiori di velocità del vento, velocità di rotazione, azione di portanza sul profilo alare dopo il distacco, ma le cause che porterebbero ad un eventuale distacco della pala o parte di essa sono rappresentate da un colpo di fulmine o da un urto accidentale di notevole intensità agente sulla longitudinale della torre. L’accadimento di tali fenomeni ha un valore di rischio molto basso, resi ancora più bassi dal fattore di contemporaneità. Si tenga conto che tutte le turbine eoliche sono dotate di un complesso sistema parafulmine, e per quanto riguarda l’urto non è pensabile potersi tutelare da un incidente, quale un velivolo o altro, che impatta sul rotore di una turbina o alla base della torre.

Di seguito la planimetria che tiene conto delle interferenze sulla gittata massima in caso di distacco della pala e della rottura di un frammento pari ai 2/3 della pala stessa.

È stata implementata l'area di ricaduta dell'intera pala o del singolo frammento, così come calcolato nella relazione R07 (aggiornata secondo le specifiche della Relazione Anemologica R03), sfruttando quella che è la rosa dei venti stabilita dal software, ruotata secondo l'ortogonalità del rotore rispetto alla direzione di provenienza del vento.

Le aree di ricaduta dell'intera pala o di un frammento di essa è quindi rappresentata dalla proiezione al suolo dell'ortogonalità dell'asse del rotore rispetto proprio alla rosa dei venti.



La rappresentazione restituita dimostra come non sia potenzialmente coinvolto nessun edificio dalla possibile rottura di un frammento di pala (area di ricaduta all'interno dei 170 e/o 268,15 metri dal distacco).

Da sottolineare tali informazioni tecniche.

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse.

Per ciò che riguarda l'aspetto specifico si fanno le seguenti considerazioni:

- il collegamento rigido tra le pale ed il mozzo limita sino a quasi ad annullare il rischio di distacco di una pala;
- le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro e carbonio rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche: l'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti meccaniche in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono di fatto unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato);
- gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di supervisione e controllo pale. Il sistema di controllo è basato su un sistema multiprocessore, che gestisce automaticamente tutte le funzioni della turbina come l'avvio, l'arresto, la produzione, la disponibilità dei sottosistemi. Questo sistema consente anche il controllo a distanza dell'aerogeneratore. Il sistema di protezione è un sistema cablato completamente autonomo, capace di arrestare la turbina in qualunque situazione di emergenza, escludendo danni al sistema e mantenendo i carichi al di sotto dei limiti di progetto;
- gli aerogeneratori EWT del tipo previsto in progetto, in considerazione anche del loro elevato valore commerciale, sono oggetto di programmi di manutenzione molto accurati che per quanto riguarda le pale è atto a verificare l'esistenza di piccole fratture, di cui se accertata la pericolosità determinano interventi di manutenzione ordinaria (riparazioni) o straordinaria (sostituzione del pezzo);
- La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto con parafulmini. In conformità a quanto previsto dalla norma CEI 81-1 la classe di protezione sarà quella più alta (Classe I). In termini probabilistici ciò significa un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano danni al sistema). Pertanto, può affermarsi che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è molto limitata se non addirittura nulla.