



Regione Sicilia



Città Metropolitana di Palermo



Comune di Monreale

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE
DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI
ENERGIA ELETTRICA A FONTE RINNOVABILE
EOLICA, OPERE CONNESSE ED
INFRASTRUTTURE INDISPENSABILI
Località Frisella di Monreale (PA)**

PROGETTO DEFINITIVO	Numero elaborato: ROR	Titolo elaborato: Valutazioni sulla rottura degli organi rotanti
--------------------------------	---------------------------------	--

Proponente:	Nuova Energia Sicilia S.r.l. Via Umberto Giordano 152 90144 Palermo (PA) P.IVA. 06977220828
-------------	--

Progettisti:	Eugenio Bordonali Francesco Maria Rossi		
--------------	--	--	---

Rev.	Data	File	Descrizione revisione	eseg.	contr.	Approv..
0	29/05/2023	MON2_ROR Analisi rottura organi rotanti.doc	Emissione	FR	FR	FR

1 Premessa

Nell'ambito della progettazione di un impianto di produzione energia da fonte eolica, uno dei molteplici aspetti che viene preso in considerazione è la valutazione degli effetti sull'ambiente circostante derivanti da un evento di rottura degli organi rotanti degli aerogeneratori.

Scopo del presente documento è la conduzione di un'indagine di massima della suddetta problematica, nello spirito di voler fornire gli elementi per una valutazione il più possibile completa in considerazione dell'estrema complessità e variabilità del fenomeno di rottura.

Partendo dalla definizione del fenomeno e individuandone i principali e più comuni fattori scatenanti, verrà successivamente illustrato quello che è attualmente considerato l'approccio simulativo canonico, con riferimento a un noto studio condotto per uno dei principali costruttori di aerogeneratori, e sarà valutato il realismo delle differenti ipotesi adottate nella modellazione matematica. Si procederà dunque all'effettuazione di un calcolo simulativo per uno scenario ipotetico di distacco nel caso specifico di un aerogeneratore con le stesse caratteristiche di quelli che verranno utilizzati in progetto.

Dopo qualche cenno al metodo probabilistico dell'analisi dei rischi applicato al caso di un impianto eolico, illustrando i punti salienti e le conclusioni di uno studio condotto dall'Università di Berkeley in California, verrà effettuata un'analisi di massima del layout d'impianto proposto per il progetto in esame. Si forniranno infine alcune considerazioni conclusive, insieme a dei cenni su alcune misure di prevenzione adottabili.

2 Rottura elementi rotanti: fenomenologia distacco pala e/o frammenti

Forniamo innanzitutto alcuni cenni sull'aerogeneratore, sulle sue parti e sui fondamenti del suo funzionamento. Le pale, che vengono messe in rotazione dall'insieme delle azioni aerodinamiche della corrente ventosa, sono fissate su un mozzo e con esso costituiscono il rotore. Il mozzo trasmette il moto per via di un collegamento rigido su un primo albero di trasmissione, detto albero lento.

Allo scopo di ottenere un valore accettabile di efficienza dal generatore, tale velocità di rotazione (ridotta a pochi giri al minuto per un aerogeneratore di grandi dimensioni) viene incrementata mediante un moltiplicatore di giri azionato dall'albero lento. L'albero in uscita, detto veloce, ruoterà a una velocità angolare pari a quella dell'albero lento per il rapporto di trasmissione installato. Tali componenti meccanici sono situati entro una cabina rigida detta navicella, a sua volta installata su un supporto-cuscinetto girevole che consente di variare l'orientamento del gruppo navicella-rotore con facilità secondo la direzione del vento.

Il controllo della potenza generata e della velocità di rotazione è reso possibile da un sistema centralizzato che interviene su più parametri, tra cui il calettamento delle pale (è possibile ruotare le pale intorno al loro asse principale per variare l'incidenza relativa della vena fluida, e con essa l'intensità e direzione della risultante aerodinamica) e l'orientamento della navicella (controllo dell'imbardata o *yaw*).

A regime, il piano del rotore sarà sempre orientato perpendicolarmente alla direzione del vento (il vento investirà il rotore frontalmente), offrendo costantemente lo stesso profilo alare delle pale e garantendo il mantenimento del verso orario di rotazione indipendentemente dalla direzione del vento.

Da ciò ne segue che in condizioni operative il verso della velocità tangenziale della pala (o di un suo frammento), rispetto a quello del vento, è sempre noto.

La letteratura di settore ha studiato vari casi di rischio caduta oggetti dall'alto connesso alla operatività di un aerogeneratore, fondamentalmente raggruppabili in due categorie di base:

- caduta di frammenti di ghiaccio formatisi sulla pala;
- rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Considerate le caratteristiche climatiche dell'area d'impianto nel caso specifico in esame, scegliamo di tralasciare il fenomeno della caduta di frammenti di ghiaccio (la cui incidenza statistica si può considerare praticamente trascurabile) per concentrarci sull'indagine del danno che potrebbe essere provocato da elementi rotanti in caso di rottura.

Torneremo più avanti sul tema dell'analisi del rischio, ma per il momento anticipiamo che il rischio in quanto tale si considera come combinazione di due fattori:

- la probabilità che possa accadere un determinato evento;
- la probabilità che tale evento possa avere conseguenze sfavorevoli.

La valutazione della probabilità specifica che possa avvenire il distacco di un frammento di pala è connessa a una molteplicità di fattori che non è possibile determinare con accuratezza. Nel contesto dell'analisi del rischio, al mero scopo di avere una dimensione indicativa dell'incidenza del fenomeno, si farà infatti riferimento a dati statistici generali estrapolati dalla letteratura esistente.

In base alla letteratura di settore, per tutti quegli incidenti che non siano riconducibili a cause eccezionali (uragani, tifoni), nella maggior parte dei casi si possono riconoscere due tipologie di fenomeno: il distacco di una delle pale dal rotore, e la rottura dell'estremità di pala.

2.1 Distacco di una delle pale dal rotore

Come già accennato, la pala è calettata sul mozzo mediante una giunzione bullonata. Può avvenire che, per varie ragioni, si possa verificare la rottura di tale collegamento. Nella maggior parte dei casi tale rottura dipende dal cedimento dei prigionieri che collegano il corpo strutturale della pala (il longherone) al mozzo.

2.2 Rottura dell'estremità di pala

Le pale dei rotori sono realizzate in materiale composito: tipicamente fibra di vetro rinforzata con materiali plastici quali il poliestere, o fibre epossidiche. La scelta dei materiali è dettata dalla necessità di garantire una resistenza strutturale adeguata alla variabilità delle sollecitazioni di natura aerodinamica e meccanica, contenendo al tempo stesso la massa delle parti in rotazione.

A seguito di traumi meccanici di particolare intensità, si può manifestare un danneggiamento strutturale della pala dell'aerogeneratore. La discontinuità nella resistenza strutturale può determinare l'apertura di una cricca. Benché le fibre che compongono la pala tendano nella maggior parte dei casi a mantenerla comunque unita in unico pezzo, per quanto gravemente danneggiato, la frattura può propagarsi in corrispondenza dei cicli operativi di funzionamento e carico strutturale della pala, fino a determinarne la frammentazione.

Il principale fenomeno che comporta questo tipo di rottura della pala è la fulminazione diretta atmosferica. Proprio per questa ragione le normative tecniche vigenti prescrivono dei sistemi di protezione: ad esempio la norma CEI 81-1 individua la classe di protezione più elevata (Classe I) per gli aerogeneratori, che corrisponde a un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano dei danni al sistema). Le pale sono quindi protette da sistemi di drenaggio della corrente di fulmine (vi sono tipicamente dei recettori metallici all'estremità della pala e lungo l'apertura della stessa, collegati a un sistema di messa a terra) che consentono di scaricare buona parte delle correnti indotte da fulminazione.

Tuttavia, può capitare che la corrente di fulmine effettiva ecceda i limiti progettuali fissati dalle normative tecniche di omologazione. A seconda dell'entità della scarica, si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che comporta la separazione dei due gusci del rivestimento, non necessariamente accompagnato da un distacco istantaneo. La dimensione dei frammenti che eventualmente si distaccano è altamente variabile e non facilmente prevedibile, considerata la natura dell'evento.

2.3 Considerazioni sul moto di un elemento rotante

La valutazione della traiettoria del moto di un elemento rotante in seguito al distacco dal rotore costituisce, dal punto di vista della fisica, la combinazione di un problema di balistica classica con la stima delle azioni aerodinamiche e degli effetti del moto rotazionale del corpo rigido.

Da una prima riflessione si potrebbero individuare le condizioni iniziali del moto al momento del distacco di una pala o di un suo frammento. Dalla velocità di rotazione del rotore conosciamo infatti la velocità angolare, che in combinazione con le dimensioni caratteristiche dell'aerogeneratore può dare la velocità tangenziale di cui abbiamo già fatto cenno. La posizione iniziale e l'intensità e verso della corrente ventosa completano i dati di partenza.

Tuttavia, la valutazione delle caratteristiche dell'elemento oggetto di distacco è estremamente complessa, e la forte dipendenza dai particolari costruttivi indica la necessità di uno studio specifico direttamente eseguibile soltanto dal Costruttore. Inoltre, anche quando per assurdo fosse individuato il frammento e la sua modalità di distacco, il calcolo del moto effettivo verrebbe complicato da ulteriori fattori come le azioni aerodinamiche (portanza, resistenza e momento aerodinamico) di cui è difficile se non impossibile tenere conto specialmente per i frammenti irregolari.

Ciò detto, nello spirito di voler comunque compiere una valutazione di massima degli effetti di rottura degli organi rotanti, si può pensare a titolo indicativo di individuare alcuni casi-tipo generici e di procedere a una valutazione sulla base di ipotesi semplificative e il più possibile conservative.

3 Uno standard di riferimento: lo studio VESTAS

Uno dei più completi studi disponibili è quello condotto dall'ente di ricerca BP Power Ltd per conto di uno dei principali costruttori di aerogeneratori, la società danese Vestas Wind System A/S, dal titolo "*Vestas V80 – Blade Throw calculation under normal operating conditions*" (2001), ripreso e aggiornato dalla stessa Vestas anche nel "*Blade Flight Report – Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento*" del 03/06/2008.

Lo studio citato si propone di valutare la gittata non solo per l'intera pala ma anche per il caso più complesso dei frammenti. Viene preso in considerazione il caso di frammenti della lunghezza di 5 e 10 metri, che si distaccano dalla struttura dell'aerogeneratore nell'ipotesi che la rottura avvenga in modo fragile e nell'ipotesi conservativa che i sistemi di controllo quali freno aerodinamico e sistema parafulmine siano completamente fuori servizio.

Si ipotizza che, in assenza di forze aerodinamiche, la massima gittata si ottenga quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 45° (corrispondenti a 135° in posizione Azimutale). Le azioni aerodinamiche di resistenza agenti sulla pala in realtà dissipano energia e rendono di conseguenza minore il tempo di volo, riducendo la gittata effettiva. Il moto reale dipenderebbe, come già accennato, dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali di moto relativo rispetto al mezzo fluido (rollio, imbardata e beccheggio della pala), oltre che dall'angolo di lancio e dall'impulso iniziale. Inoltre, per il principio della conservazione della quantità di moto, la pala dotata di velocità angolare continuerà a ruotare dopo il distacco. Riferimento fondamentale rimane il tempo di volo, che viene calcolato considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. L'unica forza inerziale considerata lungo questo asse è la forza di gravità. Essendo nota la durata del volo, conoscendo le velocità sui piani orizzontale e verticale è possibile determinare la traiettoria. La modellazione delle forze inerziali viene effettuata sulla base di un flusso irrotazionale e stazionario.

Lo studio propone differenti simulazioni di due modelli fondamentali di moto 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; come già accennato, il presente studio ipotizza che la rottura 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 delle azioni aerodinamiche, è sostenuta da una 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 definiti *in-plane* e *out-plane*.
4. La velocità di rotazione adottata nel calcolo è di 24.75 giri al minuto (in condizioni cautelative maggiorato del 10%), quindi la velocità di distacco, che agisce nel piano dove giace l'asse della torre (*in-plane*), è direttamente correlata ad essa mediante la formula di definizione della velocità tangenziale a partire da quella angolare: $V = \omega * r$
5. La velocità del vento al momento del distacco, che agisce ortogonalmente all'asse del mozzo, viene considerata di 22.5 m/s. Tale ipotesi è conservativa in quanto la distanza fuori piano (*out-plane*) viene maggiorata, poiché tale componente vettoriale della gittata dipende dal vento laterale.
6. Viene considerata unicamente la componente della forza di resistenza aerodinamica dovuta alla forma della singola pala agente nel piano orizzontale: il coefficiente di resistenza verrà opportunamente variato in alcuni sotto-casi per simulare condizioni differenti.
7. Si ipotizza che il distacco della pala dal resto della struttura sia netto, ovvero che la rottura avvenga in modo fragile senza considerare l'effettiva struttura fibrosa e filamentosa del corpo della pala e i suoi effetti sul moto (anche questa ipotesi è conservativa, in quanto si minimizza la resistenza aerodinamica di forma).

Vengono ipotizzati tre casi principali di studio.

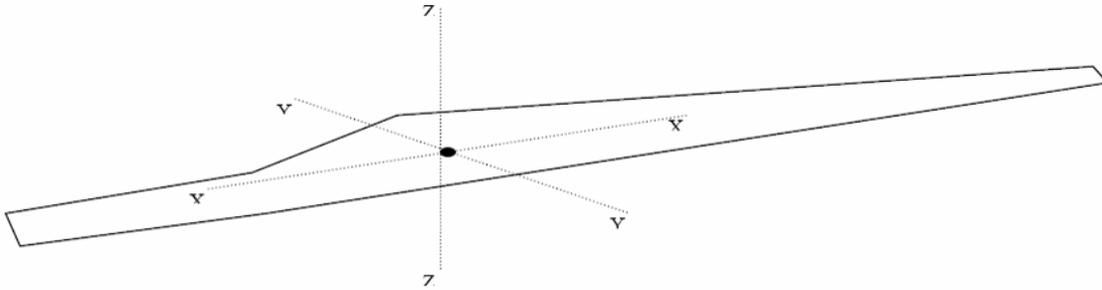


Figura 1: Sistema di assi della pala (origine nel baricentro)

3.1 Caso 1: Moto irrotazionale, pala “verticale”

Assenza di moti intorno agli assi XX , YY e ZZ . L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano verticale. Questa ulteriore assunzione fa sì che, secondo la società che ha condotto lo studio, questo caso sia peggiorativo, in quanto definirebbe la condizione ideale di massima gittata.

Quindi:

- Assenza di forze di portanza aerodinamica agenti lungo la direzione in-plane;
- Massima resistenza generata lungo la direzione out-of-plane;
- La resistenza nel piano agisce sulla sezione nel piano XZ .

3.2 Caso 2: Moto irrotazionale, pala “piatta”

L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano orizzontale. Quando la pala ha raggiunto questa posizione, analogamente al caso 1, non ci sono ulteriori moti intorno agli assi XX , YY e ZZ . In questo caso la traiettoria risultante è del tipo “a giavellotto” (*javeling*). Analogamente al caso 1, anche questo caso definirebbe la condizione ideale di massima gittata.

Quindi:

- La traiettoria verticale è incrementata dalla forza di portanza generata dalla pala, non più agente sul piano orizzontale come nel caso 1, per cui il tempo di volo e di conseguenza la gittata sarebbero maggiori rispetto all'ipotesi di assenza di portanza.

L'effetto della portanza viene a sua volta modellato secondo tre sotto-ipotesi:

- Caso 2a: l'effetto della portanza sul tempo di volo è zero. La soluzione approssimata per questo caso è data dal caso 1, ma solo nella direzione in-plane (in quanto la traiettoria out-plane risultava in quel caso influenzata dalla resistenza aerodinamica).
- Caso 2b: L'effetto della portanza sul tempo di volo comporta un aumento della durata del 5%.
- Caso 2c: L'effetto della portanza sul tempo di volo comporta un aumento della durata di un ulteriore 5%. In questo caso si ottiene il maggior tempo di volo.

3.3 Caso 3: Moto rotazionale complesso

In questo caso si studia il moto della pala al distacco del rotore nel suo complesso, considerando anche i moti di rotazione intorno agli assi XX, YY e ZZ. Questo caso dovrebbe dare la proiezione più realistica della traiettoria di una pala. La rotazione della pala intorno all'asse ZZ è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto. L'incidenza del vento out-of-plane sulla pala genera un momento intorno all'asse YY (poiché centro di massa e centro aerodinamico della pala non sono coincidenti). Il vento incidente out-of-plane sulla pala genera ancora un momento intorno all'asse XX (centro di massa della sezione di pala lungo la corda non coincide con il centro aerodinamico).

La resistenza aerodinamica agente sulla pala sia in-plane che out-of-plane è generata dalla rotazione intorno agli assi XX e YY. Per semplificare lo studio si è assunta l'area frontale della pala pari alla stessa in direzione XY, moltiplicata per il quadrato del coseno di 45°.

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

Sono state modellate tre sotto-ipotesi per altrettanti valori del coefficiente adimensionale di resistenza aerodinamica:

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

L'aerogeneratore di riferimento, nello studio citato, per la gamma completa di casistiche simulate è il Vestas V80, le cui caratteristiche fondamentali sono riassunte nella scheda seguente:

Specifiche Tecniche aerogeneratore Vestas V80 – 2MW

Diametro rotore:	80 m
Lunghezza pala:	39 m
Velocità di rotazione max:	19,2 giri/min
Velocità di rotazione nominale:	16,7 giri/min
Altezza mozzo:	67 m

Allo scopo di confrontare le differenti metodologie e di compiere alcune riflessioni sulla validità dei modelli adottati, riporteremo qui di seguito i risultati dello studio citato.

3.4 Confronto dei risultati e delle metodologie

EDB-no.:
Issued by: P&PE/CAP

BLADE THROW CALCULATION UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS V80 – 2MW

Date 2005-08-20
Class: I
Page: 8 of 9
RU1

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 1: Risultati simulazione moto irrotazionale (giavellotto) per distacco elementi rotanti aerogeneratore Vestas V80. Fonte: studio Vestas.

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	169.2	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 2: Moto rotazionale complesso per distacco elementi rotanti aerogeneratore Vestas V80. Fonte: studio Vestas.

3.5 Riflessioni sulla validità del calcolo dei frammenti

La Vestas, costruttore di aerogeneratori di grande esperienza e leader globale del settore, compie alcune riflessioni sulle metodologie di calcolo e sui modelli da tenere in considerazione. Nello studio citato infatti, si sostiene che poiché a livello costruttivo esiste effettivamente un punto di discontinuità strutturale nell'attacco bullonato che collega la pala al mozzo, ha certamente senso effettuare un calcolo di gittata della pala intera: esiste infatti un'ipotesi, seppur remota, di cedimento dell'attacco.

Il calcolo di gittata nel caso di distacco di frammenti e porzioni di guscio risulta invece problematico e privo di basi computazionali, in quanto lo stabilire le dimensioni del pezzo di guscio distaccato è del tutto aleatorio e non dipendente da una causa specifica come quelle collegabili ad una discontinuità, un difetto di progettazione di realizzazione della pala. Sempre stando al costruttore, il caso di distacco di porzioni di pala si potrebbe trattare effettuando un'analisi del rischio (come già accennato in precedenza) come composizione della probabilità di occorrenza della specifica rottura e la gravità delle conseguenze. Una simile analisi comporterebbe comunque delle assunzioni arbitrarie fra le quali parametri come le dimensioni del pezzo di pala interessato al distacco, e uno studio probabilistico specifico sull'occorrenza e la gravità delle conseguenze.

Per effettuare queste valutazioni si rende necessaria la conoscenza di tutta una serie di circostanze circa gli eventi di questo tipo, e la base statistica degli eventi incidentali dovrebbe essere notevolmente ampia e omogenea (un database con simili caratteristiche non è realmente disponibile).

3.6 Riflessioni sull'applicabilità dell'ipotesi pure javeling contro il moto rotazionale complesso

Nello studio citato la Vestas dichiara che l'esperienza pratica su tutta la flotta operativa (4.959 unità al giugno 2007) ha mostrato che in caso di distacco di pala o parti di essa il moto è stato di tipo "rotazionale complesso" e le distanze raggiunte sono normalmente risultate inferiori a quelle

stimate con i calcoli semplificati che sono stati presentati. Frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, per la maggior parte staccatisi a causa di azioni esterne (la già citata fulminazione atmosferica ad esempio) o imperizia umana, sarebbero stati ritrovati a circa 40-50 m dalla base dell'aerogeneratore.

Il moto irrotazionale definito "*Pure javeling*", corrispondente alle categorie di casi 1 e 2 (Tab.1), viene considerato estremamente improbabile dagli stessi autori dello studio, e rappresenterebbe un mero esercizio matematico. La condizione di irrotazionalità stessa è quella che effettivamente sarebbe meno verosimile sul piano reale. Infatti, sebbene la pala stessa (o un suo frammento) possa essere considerata in regime operativo come un corpo rigido vincolato al mozzo, successivamente al distacco lo stesso corpo diviene "libero" di muoversi senza essere più soggetto al momento delle reazioni del mozzo. L'oggetto distaccato conserverà il moto di rotazione che aveva all'istante del distacco, ossia si metterà a ruotare intorno ad un suo asse principale d'inerzia. Le forze di resistenza aerodinamica del mezzo fluido non interverranno sulla moto di rotazione del corpo, se non smorzandone la velocità di rotazione e incurvandone eventualmente la traiettoria.

Di conseguenza, l'unico moto che si avvicina al caso reale è il modello di rotazione complessa del corpo rigido, corrispondente alla categoria del caso 3 (Tab. 2). Viene fatto rilevare come, anche in questo caso, i valori delle gittate siano assolutamente indicativi in quanto non è stato considerato alcun sistema di controllo e di sicurezza dell'aerogeneratore.

3.7 Altre considerazioni sulla conservatività delle ipotesi

Si fa rilevare come in condizioni di normale operatività degli aerogeneratori, le macchine raggiungono la massima velocità di rotazione ben prima della velocità del vento massima ammissibile. Per la fascia più elevata di velocità del vento in fase operativa, infatti, i sistemi di controllo elettronico provvedono a variare la posizione delle pale al fine di ridurre i carichi sulle fondazioni, e per prevenire picchi di carico da eventuali raffiche che potrebbero comportare dei danni all'aerogeneratore. Paradossalmente per velocità di vento prossime al valore massimo ammissibile, la velocità di rotazione non raggiungerà il picco ma si manterrà in prossimità del valore di velocità di rotazione statica del rotore. Nel caso della Vestas V163, tale valore

corrisponderebbe a 16 giri al minuto. La scelta del valore di riferimento di 24.75 giri/min, maggiorato persino rispetto alla massima velocità rotazionale ammissibile da progetto, è di conseguenza conservativa, e compenserebbe anche eventuali effetti di sovrapportanza al momento del distacco.

Allo stesso tempo, la velocità del vento considerata, di 22.5 m/s, è ben lungi dal corrispondere a un regime operativo di 10.3 giri/min del rotore.

Si evidenzia dunque che lo studio prende in esame simultaneamente i valori massimi di tutti i parametri coinvolti, ovverosia velocità di rotazione massima, velocità del vento massima, forze di spinta. Tale approccio è decisamente cautelativo, poiché sebbene i singoli valori di picco dei parametri siano realizzabili per quanto poco probabili, è assolutamente improbabile la simultaneità di tali valori. Per questa ragione, la combinazione simultanea degli elevati valori di *in-plane* e *out-plane distance* riportati negli esempi (in particolare nel terzo gruppo di casi) è da considerarsi altamente improbabile.

4 Simulazione aerogeneratore di progetto (pala e ipotesi frammenti)

Alla luce di quanto evidenziato nella letteratura specifica, con particolare riferimento a quanto illustrato nello studio Vestas citato, per il nostro caso specifico scegliamo di simulare la condizione di moto di rotazione complessa poiché corrisponde al modello più fedele alla condizione reale.

Prendiamo in considerazione l'aerogeneratore di progetto le cui specifiche tecniche sono riportate qui di seguito:

Specifiche Tecniche aerogeneratore

Diametro rotore:	163 m
Lunghezza pala:	81 m
Velocità di rotazione max:	11.6 giri/min
Velocità di rotazione nominale:	10.3 giri/min
Altezza mozzo:	118 m

Sulla base delle considerazioni di cui allo studio citato precedentemente, provvederemo al calcolo della gittata della pala completa. Effettueremo altresì anche una stima della gittata di frammenti delle estremità della pala, dalle dimensioni arbitrarie fissate in 5 e 10 metri, a titolo puramente illustrativo. E' stata infatti già evidenziata l'estrema complessità di simulazione del caso reale di distacco di frammenti, che all'atto pratico rende impossibile la produzione di una stima valida e attendibile.

Scegliamo di trascurare l'effetto delle azioni di resistenza aerodinamica sulla gittata, ipotesi conservativa dal momento che si dissiperebbe meno energia cinetica e di conseguenza si otterrebbe una maggiore distanza percorsa. Eventuali azioni aerodinamiche di portanza, in abbondante sovrastima, verranno computate mediante l'incremento della frequenza rotazionale (il cui effetto di amplificazione sulle altre grandezze verrà approfondito più avanti).

La corrente ventosa in realtà comporterebbe un effetto di deviazione trasversale della traiettoria sul piano orizzontale (*out-plane* secondo l'esempio dello studio Vestas). L'entità delle azioni aerodinamiche è di difficile valutazione, specialmente nel caso dei frammenti di pala (la cui geometria irregolare non consente una modellazione del comportamento aerodinamico). Oltretutto, la deviazione più vistosa si ha nel caso dei frammenti di estremità di pala, che per la loro posizione iniziale più elevata hanno una velocità tangenziale maggiore e rimangono in volo per un lasso di tempo superiore. Inoltre, la massa ridotta in confronto alla superficie bagnata li rende più sensibili alle correnti laterali.

Poiché la nostra analisi ha come scopo la valutazione di una misura indicativa della gittata, e non la determinazione di una traiettoria precisa (che avrebbe, lo ricordiamo, ben poco senso dal momento che sono state fatte delle ipotesi semplificative), tale effetto di deviazione non verrà calcolato.

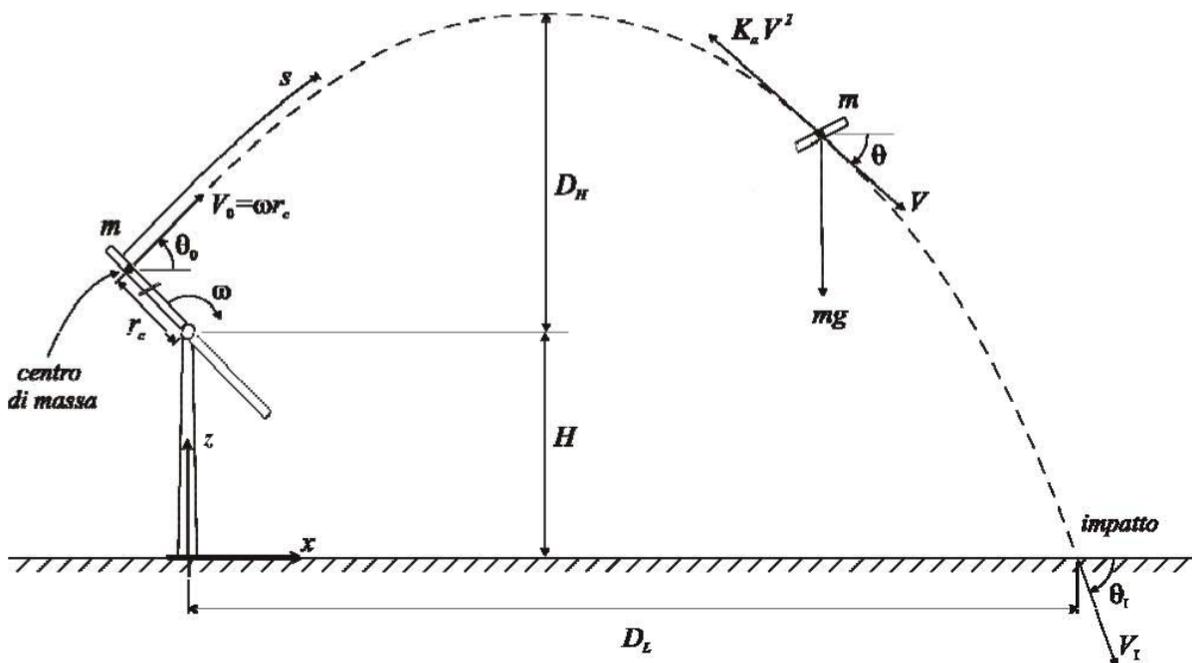


Figura 2: Vista frontale aerogeneratore e traiettoria oggetto rotante espulso

4.1 Modellazione matematica: equazioni del moto

Il moto viene studiato lungo le direzioni x (orizzontale) e z (verticale).

$$\begin{cases} \ddot{z} = -g \\ \dot{x} = 0 \end{cases} \quad \text{da cui segue} \quad \begin{cases} z = h + vt \operatorname{sen} \theta - \frac{1}{2} g t^2 \\ x = v t \operatorname{cos} \theta \end{cases}$$

dove

- h altezza iniziale del baricentro del corpo
- v velocità tangenziale iniziale del baricentro del corpo
- t tempo di volo
- ϑ angolo di lancio
- g accelerazione gravitazionale

Il moto si conclude quando il corpo tocca terra, che corrisponde alla condizione $z = 0$, ovvero

$$h + vt \operatorname{sen} \theta - \frac{1}{2} g t^2 = 0$$

Poiché il tempo t può avere solo valore positivo, la soluzione dell'equazione in t può avere solo valore positivo, la soluzione dell'equazione in t è

$$t = \frac{1}{g} \left(v \operatorname{sen} \theta + \sqrt{v^2 \operatorname{sen}^2 \theta + 2 g h} \right)$$

Tale espressione può essere sostituita all'interno dell'equazione del moto orizzontale per ottenere l'espressione della gittata

$$x = \frac{v}{g} \operatorname{cos} \theta \left(v \operatorname{sen} \theta + \sqrt{v^2 \operatorname{sen}^2 \theta + 2 g h} \right)$$

Il massimo di questa funzione darà la condizione di massima gittata, che dipende quindi dall'angolo di lancio ϑ , dalla velocità tangenziale v (e quindi dalla velocità di rotazione e dalla posizione del baricentro del corpo rispetto al mozzo), e dalla quota iniziale h del baricentro del corpo che si distacca.

Ricordiamo la relazione tra la velocità tangenziale e quella angolare

$$v = \omega r_G$$

dove

ω velocità angolare di rotazione

r_G distanza del baricentro del corpo dal centro di rotazione

ed esprimiamo l'altezza iniziale del baricentro del corpo in funzione delle dimensioni caratteristiche dell'aerogeneratore e dell'angolo geometrico di lancio (che corrisponde all'angolo di rotazione del rotore)

$$h = H_{\text{mozzo}} + r_G \cos \theta$$

A questo punto possiamo esprimere la gittata x come funzione della sola variabile ϑ , in modo da poterla studiare agevolmente e ricavarne il valore massimo.

$$x(\theta) = \frac{\omega^2 r_G^2 \sin 2\theta}{2g} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2g H_{\text{mozzo}} + r_G \cos \theta}{\omega^2 r_G^2 \sin \theta}} \right) + r_G \sin \theta$$

4.2 Risultati della simulazione

Simulazione 1: distacco della pala intera

Dati in ingresso

Altezza mozzo H_{mozzo}	118 m
Lunghezza corpo	81 m
Distanza del baricentro del corpo r_G	26.67 m
Frequenza max di rotazione di progetto	12,1 giri/min
Velocità tangenziale baricentro del corpo v	32.38 m/s

Dati in uscita

Angolo di gittata max ϑ_{max}	29°
Distanza massima di caduta x_{max}	192 m

Quanto detto vale per il moto del baricentro del corpo. Nel caso in cui il corpo dovesse ribaltarsi e andare a toccare il suolo con l'estremità più lunga rispetto al baricentro, la massima distanza coperta da quella estremità della pala intera sarebbe pari a $192 + 81/2 = 233\text{m}$.

5 Approccio probabilistico caso UC Berkeley, cenni sull'analisi dei rischi

Si è già accennato all'estrema complessità della conduzione di uno studio probabilistico esatto per quanto concerne il distacco di frammenti di pala, per via delle numerose variabili coinvolte e della non linearità delle stesse.

Inoltre, una simile valutazione potrebbe essere condotta soltanto dal Costruttore dell'aerogeneratore, che poi si troverebbe comunque a dover riadattare lo studio alle condizioni al contorno specifiche dei siti di nostro interesse.

A oggi, lo standard comunemente adottato nello studio della gittata degli organi rotanti nell'ambito di un progetto di parco eolico, prevede la stima della gittata della pala intera e, solo a titolo informativo, qualche cenno al caso dei frammenti.

Nel caso specifico, pur presentando ed evidenziando le problematiche che impediscono la conduzione di uno studio esatto, e rimanendo pertanto nei limiti di uno studio preliminare, si è cercato di approfondire il tema in senso "trasversale", al fine di fornire una panoramica più ampia e completa.

A tal fine si ritiene opportuno citare l'approccio adottato dalla University of California, Berkeley nello studio "*Analysis of potential safety risks of the Ecogen Prattsburgh-Italy wind farm project*" (2005). Il documento in questione presenta una valutazione preliminare dei rischi potenziali ambientali e sociali connessi ad eventi di rottura degli aerogeneratori previsti nel progetto di un parco eolico in località Prattsburgh-Italy (New York), quantificando tali rischi e confrontandoli con altre categorie di rischi comuni.

Preso in esame un caso base di distanza di 100 m dall'aerogeneratore, il rischio che un essere umano, che si trovi ipoteticamente fisso in quella posizione per un periodo di un anno, venga colpito letalmente da una pala o da un frammento di essa viene quantificato come una probabilità su un milione per ciascun anno di permanenza.

Causa	Rischio di incidente letale / Anno	Rischio di incidente letale / Anno
Aerogeneratore ¹	1 su 1 milione	1×10^{-6}
Influenza	1 su 5,000	2×10^{-4}
Leucemia	1 su 12,500	8×10^{-5}
Bicicletta (Stati Uniti)	1 su 333,000	3×10^{-6}
Incidente stradale (Stati Uniti)	1 su 6,250	1.6×10^{-4}
Colpito da un'automobile (Stati Uniti)	1 su 20,000	5×10^{-5}
Investimento (Stati Uniti)	1 su 250,000	4×10^{-6}
Alluvione (Stati Uniti)	1 su 455,000	2×10^{-6}
Tornado (Stati Uniti Centro-Occidentali)	1 su 455,000	2×10^{-6}
Terremoto (California)	1 su 588,000	2×10^{-6}
Fulminazione (Regno Unito)	1 su 10 milioni	1×10^{-7}
Meteorite	1 su 10 miliardi	1×10^{-10}

Tabella 3: confronto delle probabilità annuali di incidenti letali per alcune categorie di attività (estratto). Fonte: University of California, Berkeley.

Successivamente, l'analisi prosegue confrontando il rischio di incidente da organo rotante di aerogeneratore (come già definito sopra) con altri eventi fatali di pari probabilità annuale (1 probabilità su 1 milione di casi per ciascun anno) dovuti ad attività comuni.

¹ Nell'ipotesi di essere colpiti da una pala, o un frammento di essa, di un aerogeneratore da 1.5 MW di diametro 77 m a 100 m di distanza dalla turbina.

Attività	Causa della fatalità
Fumare 1.4 sigarette	cancro, attacco cardiaco
Bere 0.5 litri di vino	cirrosi epatica
Trascorrere 1 h in una miniera di carbone	antracosi
Trascorrere 3 h in una miniera di carbone	incidente
Vivere 2 giorni a New York o a Boston	inquinamento atmosferico
Viaggiare per 6 minuti in canoa	incidente
Percorrere 10 miglia (16 km) in bicicletta	incidente
Percorrere 300 miglia (480 km) in auto	incidente
Volare per 1000 miglia (1600 km) su un jet	incidente
Volare per 6000 miglia (9600 km) su un jet	cancro causato dai raggi cosmici
Radiografia al torace in un buon ospedale	cancro causato dalle radiazioni
Convivere per 2 mesi con un fumatore	cancro, attacco cardiaco
Bere acqua potabile di Miami per 1 anno	cancro causato dal cloroformio
Bere 30 lattine da 33 cl di diet soda	cancro causato dalla saccarina
Bere 1000 bevande in bottigliette da 66 cl	cancro causato dal monomero acrilonitrile
Mangiare 100 bistecche alla griglia	cancro causato dal benzopirene

Tabella 4: esempi di attività comuni che comportano un rischio annuale di fatalità di una probabilità su un milione di casi (estratto). Fonte: University of California, Berkeley.

Dopo questo confronto preliminare, che mostra come il rischio connesso statistico sia sostanzialmente ridotto in confronto ad altre attività comuni, lo studio illustra i metodi di calcolo adottati per la stima della probabilità di incidente connesso all'aerogeneratore.

Fondamentalmente vengono considerate tre tipologie di eventi:

1. Rischio di impatto con frammenti di ghiaccio lanciati dalle pale in rotazione
2. Rischio di rottura della pala o di parte di essa
3. Rischio di collasso della torre

Viene considerata, a titolo cautelativo, una velocità di rotazione pari al doppio della frequenza di rotazione nominale. Bisogna considerare che la turbina di riferimento adottata nello studio citato, da 4.5 MW e 163 m di diametro, ha una velocità di rotazione nominale di 12,1 giri/min.

Il rischio annuale di impatto letale, dovuto alla composizione dei tre eventi di cui sopra, viene infine calcolato al variare della distanza dall'aerogeneratore.

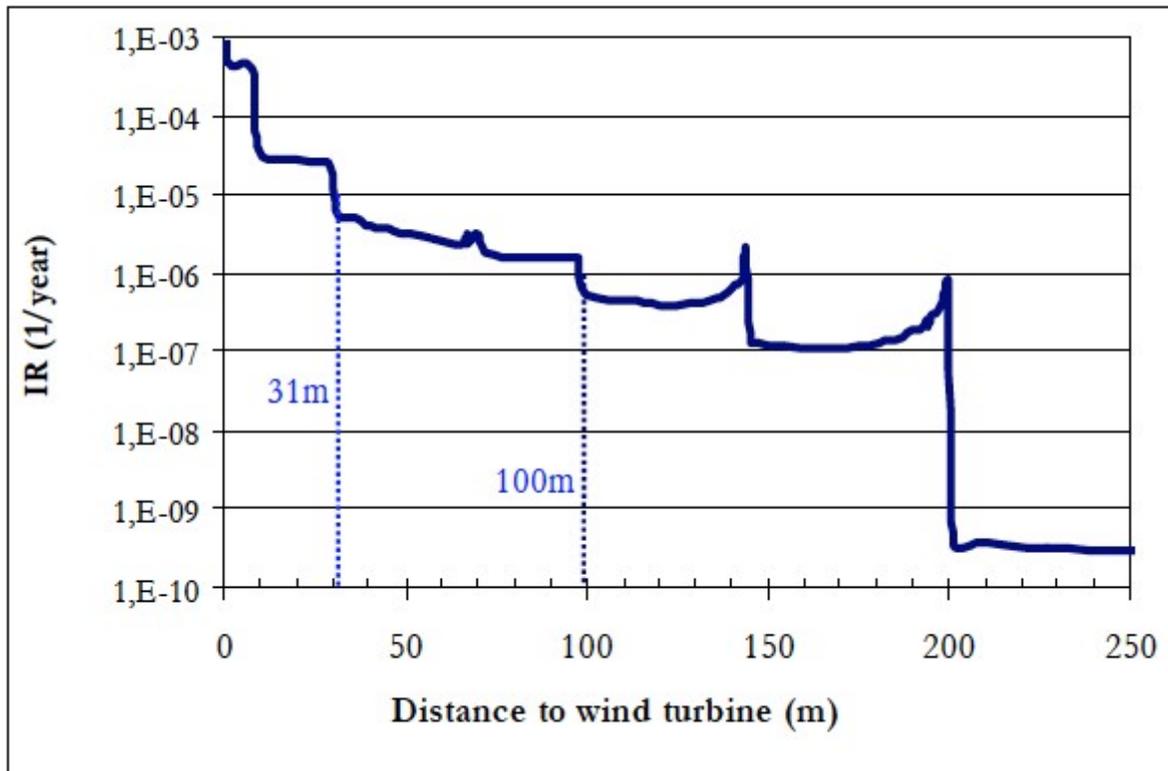


Figura 3: Rischio annuale di impatto letale al variare della distanza, per aerogeneratore da 1.5 MW, velocità di rotazione 44 giri/min, per tutti gli scenari di incidente considerati. Fonte: University of California, Berkeley.

Si conclude sottolineando che il rischio di impatto letale da oggetto distaccato da aerogeneratore (inclusi strati di ghiaccio) si può considerare estremamente ridotto, specialmente in confronto al rischio di incidente letale comportato da attività ed eventi comuni nel quotidiano.

Se volessimo confrontare a grandi linee tali risultati con il nostro caso specifico, occorre sottolineare la sostanziale assenza del rischio di impatto da frammenti di ghiaccio in corrispondenza della latitudine e dell'altitudine del sito di progetto, oltre alla minore frequenza di rotazione nominale degli aerogeneratori considerati in progetto.

Inoltre, va evidenziato come le statistiche di rottura adottate come riferimento di base dall'Università di Berkeley facciano riferimento a eventi antecedenti il 2005, e di conseguenza ad aerogeneratori più arretrati dal punto di vista dell'evoluzione tecnica (che ha peraltro subito una

particolare accelerazione nel corso degli ultimi 5/10 anni in funzione della crescita del mercato mondiale di settore).

6 Considerazioni conclusive sui frammenti, Misure di prevenzione e monitoraggio

Fermo restando quanto già discusso in merito alla questione, appare chiaro come la tipologia di evento di rottura più difficile da prevedere e stimare analiticamente sia quella del distacco di un frammento di pala. L'esperienza di un costruttore come Vestas sulla propria flotta di macchine indicherebbe che tale fenomeno rimanga comunque raro tra gli eventi di rottura, e che i detriti non sarebbero stati rinvenuti oltre i 40-50 m di distanza dall'aerogeneratore (cfr. [1] e [2]).

Ciò nonostante, siamo andati oltre e in questa sede abbiamo preferito comunque procedere a un approfondimento dei rischi connessi a tutte le casistiche facendo riferimento a un autorevole studio probabilistico dell'Università di Berkeley in California.

Quello che effettivamente fa la differenza per la minimizzazione dei rischi, soprattutto nel caso dei frammenti di pala, è la pianificazione e la messa in pratica di efficaci misure di prevenzione e monitoraggio, al fine di poter intervenire in tempo utile per scongiurare l'eventualità di una rottura. Il parco verrà esercito con un contratto di manutenzione a carico di impresa specializzata, che si occuperà quindi di:

- Prevenzione

Viene svolta tramite l'ascolto e l'osservazione giornaliera e con campagne di indagini visive. L'ascolto e l'osservazione ha lo scopo di evidenziare microalterazioni della superficie delle pale. Le campagne di indagini visive, svolte con telescopi ad alta definizione, servono a certificare periodicamente lo stato delle pale.

- Monitoraggio

Il monitoraggio strumentale avviene in maniera continua ed è svolto dal sistema automatico di controllo dell'aerogeneratore. Questo, tramite la valutazione di opportuni parametri, è in grado di individuare sbilanciamenti del rotore e, quando diventano significativi, attua il blocco dell'aerogeneratore.

Tali azioni di prevenzione sono dunque volte a mantenere le buone condizioni di uso dei rotori, mentre le azioni di monitoraggio impediscono di mantenere in esercizio operativo dei rotori che non rispondano alle caratteristiche definite dal costruttore.

Si ritiene quindi che queste azioni di monitoraggio riducano la reale probabilità di rottura ad incidenti imprevedibili come la fulminazione di una pala, anchessa comunque molto difficile a maggior ragione per via dei sistemi parafulmine di cui le pale sono dotate.

7 Riferimenti bibliografici

1. *“Vestas V80 – Blade Throw calculation under normal operating conditions”* - Vestas Wind System A/S (2001)
2. *“Blade Flight Report – Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento”* – Vestas Mediterranean A/S (2008)
3. *“Analysis of potential safety risks of the Ecogen Prattsburgh-Italy Wind Farm Project”* – University of California, Berkeley (2005).