



Statkraft



Per Ski 21 S.r.l.

ATTIVITÀ DI PROGETTAZIONE PIPELINE WIND SARDEGNA

IGLESIAS

RELAZIONE SPECIALISTICA-ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI HH0694A-IG-PD-RE-27

0	10/11/2023	Emissione finale	Roveccio	Esposito	Clerici
Rev.	Data di emissione	Descrizione	Preparato	Controllato	Approvato

WSP E&IS Italy S.r.l



Via S. Caboto, 15 – 20094 Corsico- Milan – Italy

Tel. +39 02 4486 1 - Capitale Sociale i.v. € 190.000,00

Codice Fiscale/Partita IVA/Reg. Imprese Milano 12363640967 – R.E.A. MI N° 2656546



PEC: Environment.infrastructure@legalmail.it

Fatturazione Elettronica: Codice Destinatario ISHDUAE – PEC: invoices-woodplc@legalmail.it

 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 2 a 12

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
2	ESPERIENZE E NOTE STATISTICHE	5
2.1	Distacco di una delle tre pale del rotore	6
2.2	Rottura di un'estremità della pala	6
3	CALCOLO DELLA GITTATA	7
3.1	Geometria del problema	7
3.2	Dati di base del calcolo ed ipotesi	7
3.3	Equazioni generali del moto	9
3.4	Calcolo della gittata	9
4	CONCLUSIONI	11
5	PRECISAZIONI	12

 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 3 a 12

1 INTRODUZIONE

Il presente documento è stato predisposto da parte di WSP E&IS Italy S.r.l., parte di WSP Group (qui di seguito WSP E&IS) su incarico di Nexta Project Development S.r.l. (qui di seguito Nexta).

L'esperienza di pluriennale esercizio dei moderni impianti eolici attesta come le turbine di grande taglia siano installazioni estremamente affidabili sotto il profilo meccanico-strutturale nonché ambientalmente sicure.



In accordo con quanto suggerito dalle Linee Guida Nazionali sulle Fonti Rinnovabili (DM 10/09/2010), nel seguito sarà condotta una stima approssimativa della distanza massima che può essere raggiunta da una pala di un generatore eolico tipo SIEMENS SG 6.6-170– 6.6 MW con altezza al mozzo di 135 m, nell'ipotesi di distacco dell'intera pala durante condizioni nominali di funzionamento dello stesso.

Premesso che la determinazione della reale distanza raggiunta da una pala distaccatasi dal rotore di un aerogeneratore (c.d. gittata), in funzione delle condizioni iniziali e al contorno, è estremamente complessa, a causa dell'influenza di un elevato numero di fattori, le stime semplificate di seguito condotte, hanno l'obiettivo di pervenire ad un valore indicativo di riferimento e di determinare l'incertezza approssimativa del dato stesso.



In particolare, lo studio è stato condotto calcolando la gittata del centro di gravità (stimato) della pala, a partire dalle condizioni iniziali teoriche di massima gittata ($\pm 45^\circ$ dall'asse orizzontale con pala in salita) e con ipotesi semplificative circa gli effetti della resistenza/portanza aerodinamica.

I calcoli di seguito illustrati pervengono, in ogni caso, ad una stima conservativa circa la portata del fenomeno includendo solo le forze d'inerzia ed escludendo le forze viscosse. Al riguardo le verifiche sperimentali condotte sulle turbine in esercizio indicano come le forze di resistenza che si esercitano sulla pala fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20% rispetto a quella stimata secondo le ipotesi di calcolo sopra indicate. Come fonte e/o approfondimento vedere "Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento", redatto da Vestas.

Il distacco o la rottura della pala sono eventi che si verificano per condizioni operative al di fuori del normale range di funzionamento delle macchine. Gli aerogeneratori per i quali si prevede l'installazione nel sito ubicato nel comune di Iglesias, provincia di Sud Sardegna (SU), sono provvisti di sistemi di arresto che intervengono quando le condizioni di funzionamento sono tali da compromettere la funzionalità della macchina e la sicurezza pubblica.

 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 4 a 12

In riferimento alle stime condotte è stato prodotto un elaborato cartografico che documenta le potenziali sovrapposizioni delle aree di proiezione dei frammenti di pala (Elaborato HH0694A-IG-PD-RE-27a.)



 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 5 a 12

2 ESPERIENZE E NOTE STATISTICHE

La tecnologia costruttiva degli aerogeneratori è alquanto sofisticata e di chiara derivazione aeronautica, per cui, la valutazione della gittata massima degli elementi di un aerogeneratore, in caso di rottura accidentale, comporta lo sviluppo di modelli di calcolo articolati e complessi. I modelli teorici che meglio possono caratterizzare il moto dello spazio dei frammenti di pala o dell'intera pala possono essere ricondotti ai casi seguenti:

- **1° caso:** traiettoria a giavellotto con minore resistenza aerodinamica. Calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, in assenza di moto rotazionale intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria del frammento complanare al rotore.
- **2° caso:** traiettoria a giavellotto con maggiore resistenza aerodinamica. Calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, sempre in assenza di moto rotazionale, intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria complanare al rotore e frammento ortogonale rispetto al piano del rotore.
- **3° caso:** calcolo della gittata massima in presenza di moti di rotazione intorno a ciascuno dei tre assi principali del frammento stesso. In caso di rottura, infatti, per il principio di conservazione del momento angolare, il generico spezzone di pala tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano; inoltre, a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, lo spezzone di pala tende anche a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

Le condizioni prese in considerazione nel 3° caso, permettono senza dubbio un calcolo più preciso e maggiormente corrispondente al reale moto di una pala staccatasi dal rotore per cause accidentali e forniscono, sperimentalmente, un valore di gittata di circa il 20% in meno di quella fornita dal caso 1. Come già accennato precedentemente, la risoluzione del 3° caso è però più complessa e richiede la conoscenza di alcune caratteristiche degli aerogeneratori, non sempre fornite dai produttori, poiché oggetto di brevetto. Pertanto, si è deciso di utilizzare il 1° caso, di facile soluzione e che fornisce un risultato maggiorato di circa il 20%, garantendo così un ulteriore margine di sicurezza.

 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 6 a 12

2.1 Distacco di una delle tre pale del rotore

Questo tipo di incidente, comportante il distacco di una pala completa dal rotore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che assolve sostanzialmente a funzioni di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è di regola previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.



Sulla base dei dati operativi citati, gli eventi incidentali sono stati attribuiti ad errati interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore. Quindi l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.

2.2 Rottura di un'estremità della pala

Questo tipo di incidente è stato quasi sempre riscontrato in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

I moderni aerogeneratori di grande taglia sono di regola provvisti di un sistema di conduzione della corrente di fulmine dalle pale collegato ad un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche scongiurando danni alle pale.

In qualche caso, laddove la corrente di fulmine ecceda i valori di progetto (fissati dalle norme internazionali), si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci. Tale condizione, peraltro, non determina normalmente il distacco dal corpo della pala

 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 7 a 12

3 CALCOLO DELLA GITTATA

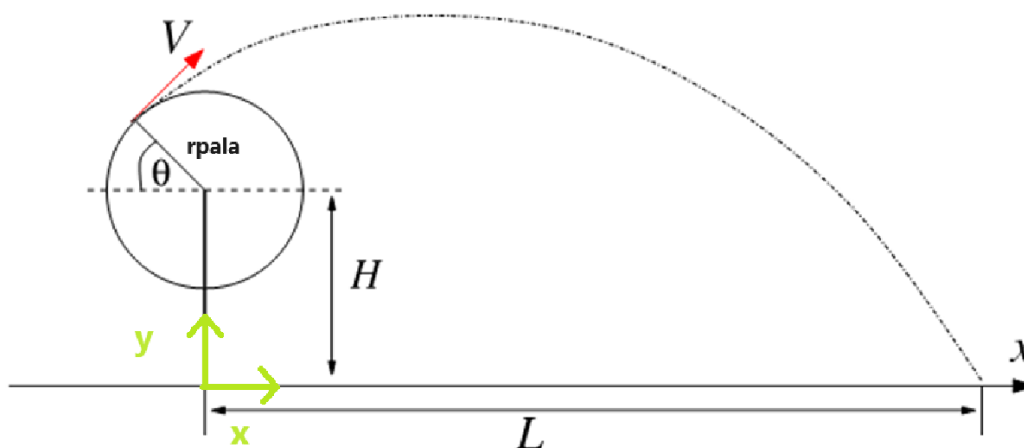
3.1 Geometria del problema

La stima della gittata di un elemento rotante si basa sull'ipotesi di considerare lo stesso come un corpo rigido, ovvero un insieme di particelle soggette a forze tali da mantenere costanti nel tempo le loro distanze relative.

Nello studio si considera il moto del corpo bidimensionale, traslatorio e curvilineo, rappresentato da un punto materiale (assunto coincidente con il baricentro dell'elemento rotante) lanciato in aria obliquamente sottoposto all'accelerazione di gravità costante "g" diretta verso il basso e a velocità iniziale impressa dalla rotazione della pala, la quale è ipotizzata ruotare in senso orario.



Il calcolo della gittata massima in caso di distacco di una pala dell'aerogeneratore segue il principio della balistica applicata al moto dei proiettili. Si sottolinea come i calcoli qui riportati siano stati condotti considerando nulla la resistenza d'attrito con l'aria, nonché gli effetti di portanza aerodinamica. Il moto reale è molto più complesso, in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). Nella figura seguente è mostrata la schematizzazione adottata:

Figura 1-Schema geometrico del fenomeno di distacco della pala di un aerogeneratore



3.2 Dati di base del calcolo ed ipotesi

Nel caso in esame si suppone che l'incidentale distacco della pala avvenga nelle condizioni più gravose ovvero:

 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 8 a 12

- *Alla velocità massima del rotore, pari a $w=9$ giri/minuto, assunta lievemente superiore a quella massima indicata per l'aerogeneratore di riferimento, e pari a 8,83 giri/minuto;*
- *Con il centro di massa ($r_{baricentro}$) posizionato ad $1/3$ della lunghezza della pala, in prossimità del mozzo;*
- *In assenza di attrito dell'aria e di effetti di portanza della pala.*

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio (θ) e dalle forze generalizzate agenti sull'aerogeneratore, le quali saranno ridotte alla sola forza di gravità, studiando un sistema privo di attriti che andrebbero a ridurre la gittata.



La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale (v_y) iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo di volo (T) è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata G) nel piano, la quale è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco iniziale.

L'aerogeneratore previsto, ossia il modello SG 66-170 da 6.6 MW, possiede:

- $H = \text{altezza del mozzo dell'aerogeneratore} = 135 \text{ [m]};$
- $r_{pala} = \text{lunghezza della pala dell'aerogeneratore} = 83,5 \text{ [m]};$
- $r_{baricentro} = \text{distanza del centro di massa della pala dal mozzo} = \frac{1}{3} \cdot r_{pala} = 27,83 \text{ [m]};$
- $\omega = \text{massima velocità angolare del rotore} = 9 \left[\frac{\text{giri}}{\text{min}} \right] = 0,94 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right];$
- $v_{baricentro} = \text{velocità tangenziale del centro di massa} = r_{baricentro} \cdot \omega = 26,23 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

Assunto un sistema di riferimento con origine sul terreno, in corrispondenza della base della torre, l'ordinata del centro di massa al momento del distacco ($y(0)$) della pala sarà data dall'altezza del mozzo sommata alla distanza verticale del centro di massa della pala rispetto al suo centro di rotazione. Tale grandezza, assieme all'ascissa al momento del distacco ($x(0)$) è riportata di seguito, con l'istante "0" riferito al momento del distacco:

$$x(0) = -r_{baricentro} \cdot \cos(\theta) \text{ [m]}$$

 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 9 a 12

$$y(0) = H + r_{baricentro} \cdot \sin(\theta) [m]$$

$$T = \text{tempo di volo} [s]$$

$$x(T) = G = \text{gittata} [m]$$

La gittata G è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo del centro di massa della pala.

3.3 Equazioni generali del moto

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto alla sola forza di gravità, in accordo con lo schema semplificato di *Figura 1*, sono le seguenti (Legge del moto):

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

$$y(t) = y_0 + v_y \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

Con $g = \text{accelerazione di gravità} = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

3.4 Calcolo della gittata

Il calcolo è stato effettuato variando l'angolo θ , con una discretizzazione al grado centigrado, a partire da 0° fino a 360° . I calcoli riportati di seguito si riferiscono all'angolo che porta ad avere la gittata massima (θ_{max}):

$$\theta_{MAX} = 75 [^\circ]$$

Posizione iniziale del centro di massa della pala rispetto ad x ed y:

$$x(0, \theta_{MAX}) = -7,2 [m]$$

$$y(0, \theta_{MAX}) = 161,88 [m]$$



Velocità iniziale del centro di massa della pala rispetto ad x ed y:

$$v_x(0, \theta_{MAX}) = 25,34 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$v_y(0, \theta_{MAX}) = 6,79 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Tempo di volo della pala:

$$T_{\theta_{MAX}} = 6,48 [s]$$

 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 10 a 12

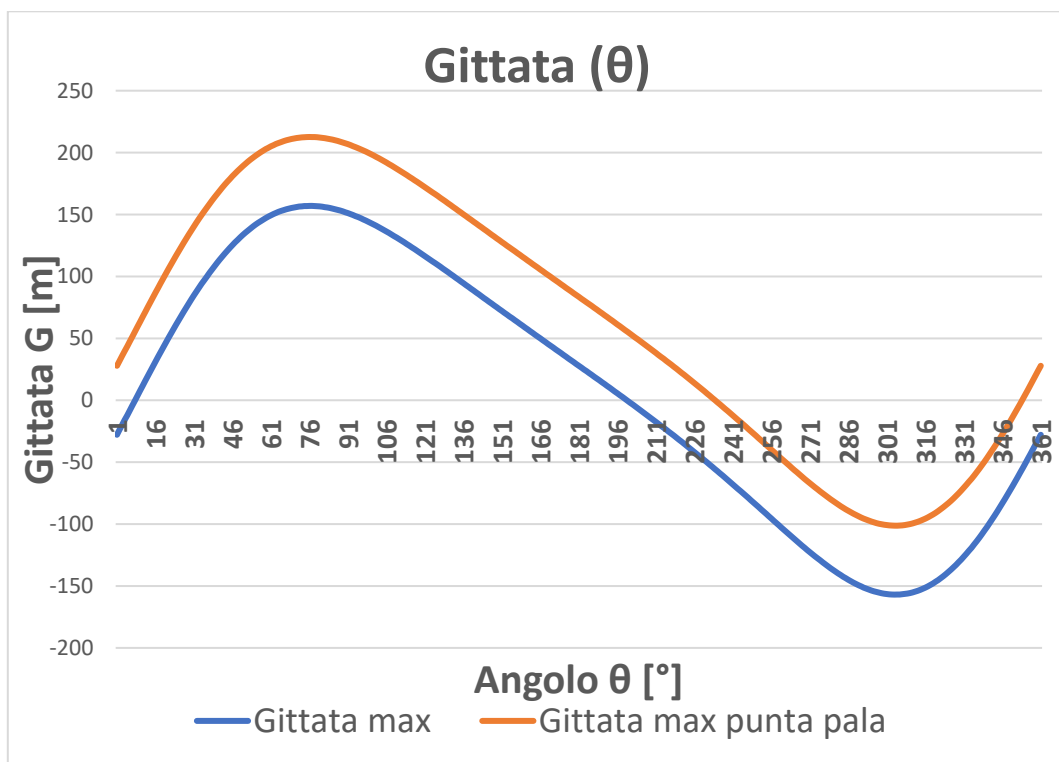
Gittata del centro di massa e della punta della pala, se essa si trova in posizione distesa lungo l'asse x in seguito all'atterraggio:



$$G_{CENTRO DI MASSA-\theta_{MAX}} = 156,95[m]$$

$$G_{PUNTA DELLA PALA-\theta_{MAX}} = 212,62[m]$$

Per completezza, di seguito viene mostrato un grafico riportante l'andamento della gittata variando l'angolo θ :

Figura 2-Gittata del centro di massa e della punta della pala al variare dell'angolo θ





 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 11 a 12

4 CONCLUSIONI

Nei casi reali, la distanza di impatto a terra calcolata in accordo con il metodo precedentemente illustrato sarà verosimilmente inferiore, sia per le condizioni iniziali al momento del distacco, che non necessariamente saranno quelle teoriche per una gittata massima, sia per i moti rotazionali della pala, dovuti ai momenti delle forze resistenti, che comporteranno ulteriori dissipazioni di energia e condizioni generalmente meno favorevoli per il moto.

In definitiva, sulla base dei calcoli condotti nonché delle predette considerazioni e valutazioni aggiuntive inerenti alle possibili dinamiche di impatto, si valuta che la distanza indicativa che può essere raggiunta da una pala di un generatore tipo SG 66-170 con altezza al mozzo di 135 m che si distacchi dal mozzo in condizioni nominali di funzionamento, sia di circa **212,62 metri**.

 	PROGETTO: Attività di Progettazione Pipeline Wind Sardegna	NUMERO DI DOCUMENTO HH0694A-IG-PD-RE-21	INDICE DI REVISIONE A
	TITLE RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA		Page 12 a 12

5 PRECISAZIONI

Il presente documento è stato preparato da WSP E&IS per Nexta unicamente per gli scopi previsti dal contratto che regola la prestazione del presente servizio. Nessun'altra garanzia, espressa o implicita, diversa da quella definita nel contratto, viene data da WSP E&IS in relazione ai contenuti oggetto del presente documento o su qualsiasi altro servizio fornito da WSP E&IS. Il presente documento non potrà essere utilizzato da terze parti senza il previo ed espresso accordo scritto di WSP E&IS.

Le valutazioni effettuate sono basate sulle informazioni ricevute da Nexta in relazione alle quali WSP E&IS non assume alcun tipo di responsabilità. Qualora intervengano significative variazioni rispetto alle informazioni utilizzate relativamente al sito, il presente documento dovrà essere aggiornato.