



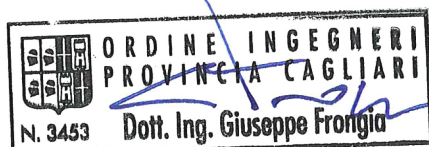
PROGETTO DI COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN  
IMPIANTO EOLICO DELLA POTENZA DI 99,2 MW  
DENOMINATO "ORRIA" DA REALIZZARSI NEI COMUNI DI  
NULVI (SS) E SEDINI (SS) CON LE RELATIVE OPERE DI  
CONNESSIONE ELETTRICHE

## RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Rev. 0.0

Data: Settembre 2023

WIND002-RA13



Repsol Orria S.r.l.  
Via Michele Mercati 39  
00197 Roma (RM)  
C. F. e P. IVA: 17089321008  
PEC: repsolorria@pec.it

Incaricato:

Queequeg Renewables, Ltd  
2nd Floor, the Works,  
14 Turnham Green Terrace Mews,  
W41QU London (UK)  
Company number: 11780524  
email: mail@quren.co.uk  
Progettazione e SIA:

I.A.T. Consulenza e progetti S.r.l.



[www.iatprogetti.it](http://www.iatprogetti.it)

## **PROGETTAZIONE:**

I.A.T. Consulenza e Progetti S.r.l.

Ing. Giuseppe Frongia (Direttore Tecnico)

## **GRUPPO DI PROGETTAZIONE:**

Ing. Giuseppe Frongia (Coordinatore e responsabile)

Ing. Marianna Barbarino

Ing. Enrica Batzella

Dott. Pian. Andrea Cappai

Ing. Paolo Desogus

Pian. Terr. Veronica Fais

Dott. Fabio Mancosu

Ing. Gianluca Melis

Dott. Fabrizio Murru

Ing. Andrea Onnis

Pian. Terr. Eleonora Re

Ing. Elisa Roych

Ing. Marco Utzeri

## **COLLABORAZIONI SPECIALISTICHE:**

Verifiche strutturali: Ing. Gianfranco Corda

Aspetti geologici e geotecnici: Dott. Geol. Maria Francesca Lobina

Aspetti faunistici: Dott. Nat. Maurizio Medda

Caratterizzazione pedologica: Agr. Dott. Nat. Nicola Manis

Acustica: Ing. Antonio Dedoni

Aspetti floristico-vegetazionali: Dott. Nat. Francesco Mascia

Aspetti archeologici: Dott. Luca Doro, Dott. Gabriele Carenti e Dott.ssa Rosana Pla Orquìn

## SOMMARIO

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Introduzione.....                                       | 4  |
| 2   | Esperienze e note statistiche .....                     | 6  |
| 2.1 | Distacco di una delle tre pale dal rotore .....         | 6  |
| 2.2 | Rottura di un'estremità della pala .....                | 7  |
| 3   | Geometria del problema.....                             | 8  |
| 4   | Dati di base per il calcolo .....                       | 10 |
| 5   | Calcolo della gittata.....                              | 11 |
| 6   | Considerazioni aggiuntive e valutazione conclusiva..... | 13 |

## 1 Introduzione

La Società Repsol Orria S.r.l., detenuta dal Gruppo Repsol Renovables SA, ha in programma la realizzazione di un parco eolico denominato “Orria” composto da n. 16 aerogeneratori da installare nei comuni di Nulvi e Sedini (Città Metropolitana di Sassari – Regione Sardegna).

Gli aerogeneratori in progetto avranno diametro del rotore fino a 172 m, una torre di altezza fino a 135 m e una potenza unitaria fino a 6,6 MW ciascuno per una potenza nominale complessiva di 99,2 MW, con conseguente limitazione della potenza massima erogata dagli aerogeneratori alla soglia di 6.2 MW.

Avuto riguardo di 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 aerogeneratore delle caratteristiche geometrico-funzionali di quelli previsti nel progetto nell’ipotesi di distacco dell’intera pala durante condizioni nominali di funzionamento dello stesso.

Ad oggi il mercato delle turbine eoliche è caratterizzato da un discreto numero di costruttori che realizzano aerogeneratori della taglia sopra indicata e questo porta ad un livello di concorrenza sullo stato d’avanzamento della tecnologia e sulle garanzie di funzionamento degli stessi. Pertanto, la scelta del costruttore e della tipologia di aerogeneratore da installare nel parco eolico avverrà al termine dell’iter autorizzativo.

Ai fini della presente analisi si è deciso di fare riferimento alle caratteristiche tecniche dell’aerogeneratore modello Vestas Enventus V172-6.5 MW, che si è ritenuto possa essere rappresentativo della taglia massima di aerogeneratore scelta per il parco eolico in esame. Sulla scelta finale dell’aerogeneratore rimane valido quanto più sopra specificato.

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.

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 (indicativamente  $\pm 30\div 45^\circ$  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 viscosive. Al riguardo, verifiche sperimentali

condotte da Vestas sulla gamma dei propri modelli di aerogeneratore in esercizio<sup>1</sup> 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.

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 nell’ambito del progetto di impianto eolico da 99,2 MW nei territori di Nulvi e Sedini (SS) 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.

---

<sup>1</sup> Dato riferito all’anno 2007

## 2 Esperienze e note statistiche

Ai fini di un corretto inquadramento delle problematiche qui esaminate, si riportano di seguito alcune note statistiche ricavate dall’esperienza operativa di uno dei principali costruttori di aerogeneratori (Vestas), ragionevolmente trasponibili ai modelli in commercio prodotti dalle principali case costruttrici.

Quanto segue è stato redatto al fine di presentare alcuni degli elementi fondamentali per valutare la reale possibilità del distacco di una pala dagli aerogeneratori.

Sotto questo profilo deve in primo luogo evidenziarsi come, dal punto di vista progettuale, la combinazione di coefficienti di sicurezza adottati, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettino quanto prescritto dalla norma IEC61400-1 (turbine safety standard). In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate “fail safe”.

L’esperienza pratica su tutta la flotta operativa Vestas di 4.959 unità (Giugno 2007) ha mostrato che in caso di distacco di pala il moto è stato di tipo “rotazionale complesso” e le distanze raggiunte sono normalmente state inferiori a quelle stimate con i calcoli semplificati qui riportati.

Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi sono descritti alcuni possibili eventi e la valutazione tecnica alla base dell’analisi dei rischi sviluppata dai costruttori per eliminare la possibilità di reiterazione dell’incidente.

### 2.1 Distacco di una delle tre pale dal 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.

In occasione di tali tipi di evento, in base ai citati dati Vestas, la pala ha raggiunto il terreno ad una distanza inferiore ai cento metri.

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 a 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.

### 3 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.

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).

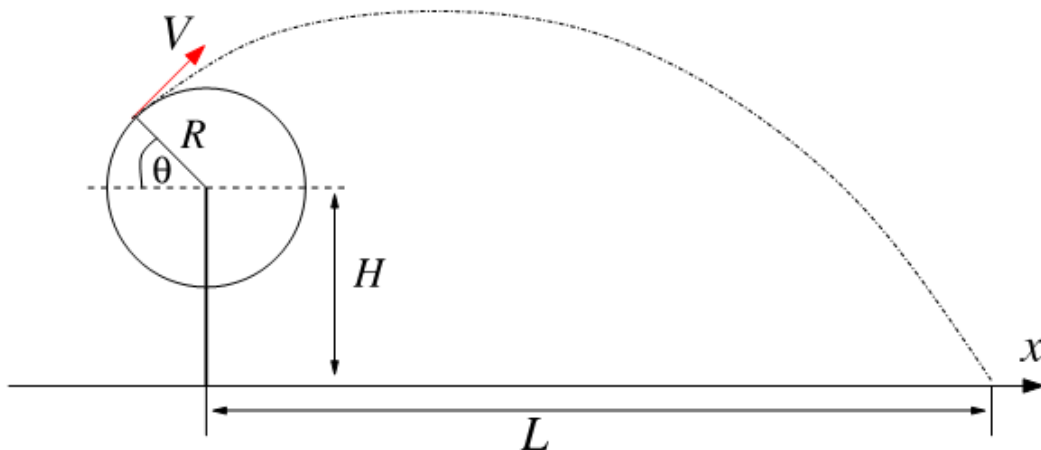


Figura 1 – Schema geometrico del fenomeno di distacco della pala di un aerogeneratore

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

$$d^2x/dt^2=0$$

$$d^2y/dt^2=-g$$

dove  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  è l’accelerazione di gravità.

La legge del moto soluzione di queste equazioni è la seguente:

$$x(t) = x_0 + v_x t \quad (1)$$

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



La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo  $\theta$  e dalla velocità tangenziale  $V$  del centro di massa della pala al momento del distacco. Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$x_0 = -R \cos(\theta)$$

$$y_0 = H_m + R \sin(\theta) \text{ con } H_m \text{ altezza al mozzo dell'aerogeneratore}$$

$$v_x = V \sin(\theta)$$

$$v_y = V \cos(\theta)$$

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

## 4 Dati di base per il calcolo

I dati di base sono quelli caratteristici dell'aerogeneratore *Vestas Enventus V172-6.5 MW*. La lunghezza della pala è pari a 84,35 m e l'altezza della torre del generatore eolico, all'asse di rotazione, 135 m.

La massa della pala di riferimento è pari indicativamente a 25.000 kg; il centro di massa della pala risulta approssimativamente posizionato ad una distanza dal centro di rotazione pari ad un terzo della lunghezza della pala.

Si è assunta per il calcolo una velocità massima di rotazione  $V$  di 12.1 rpm, pari a quella massima indicata per l'aerogeneratore di riferimento.

## 5 Calcolo della gittata

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

- alla velocità massima del rotore, pari a 12.1 giri/minuto;
- nel punto di ascissa e ordinata in cui la gittata, sulla base delle formule di calcolo sotto riportate, è risultata massima (angolo  $\theta = \sim 30^\circ$ );
- con il centro di massa posizionato ad  $1/3$  della lunghezza della pala, in prossimità del mozzo;

L'aerogeneratore previsto, ossia il modello *Vestas Enventus V172-6.5 MW*, possiede:

- altezza al mozzo dell'aerogeneratore  $H_m = 135$  m;
- lunghezza della pala dell'aerogeneratore  $L_p = 84,35$  m;
- distanza dal mozzo del centro di massa della Pala  $D_{cm} = L_p / 3 = 28,12$  m;
- Massima Velocità Angolare Rotore  $V_{ang} = 12.1 \text{ Giri/min} = 12,1 \times 2 \pi / 60 = 1,27 \text{ Rad/sec}$ ;

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate agenti sulla pala. La pala, quindi, quando inizierà il suo moto, continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità.

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

Assunto un sistema di riferimento con origine sul terreno in corrispondenza dell'asse della torre, l'ordinata del centro di massa al momento del distacco della pala è data dall'altezza del mozzo sommata alla distanza verticale del centro di massa della pala rispetto al suo centro di rotazione:

$$y_0 = H_m + D_{cm} \cdot v(2)/2 = 149,1 \text{ m}$$

Analogamente l'ascissa del centro di massa al momento del distacco risulta:

$$x_0 = - D_{cm} \cdot v(2)/2 = -24,3 \text{ m}$$

La Velocità tangenziale posseduta dal Centro di Massa  $V$  è desunta dalla Velocità Angolare  $V_{ang}$ , ossia:

$$V = V_{ang} \times D_{cm} = 35,63 \text{ m/s}$$

Le componenti verticale ( $V_y$ ) ed orizzontale ( $V_x$ ) di tale velocità lineare al Centro di Massa saranno:

$$V_x = v \cdot \cos(30^\circ) = 30,85 \text{ m/s}$$

$$V_y = v \cdot \sin(30^\circ) = 17,81 \text{ m/s}$$

Il tempo di decelerazione verticale  $T_y$  necessario perché la componente verticale della velocità sia nulla è dato dalla formula:

$$T_y = V_y / 9,8 \text{ m/sec}^2 = 1,82 \text{ s}$$

L'altezza massima  $H_{\max}$  raggiunta si ottiene dalla formula:

$$H_{\max} = y_0 + V_y * T_y - 1/2 * g * T_y^2 = 165,2 \text{ m}$$

Il tempo di caduta  $T_{\max}$  necessario affinché l'elemento rotante precipiti a terra dalla sommità si ottiene dalla relazione:

$$T_{\max} = \sqrt{H_{\max} / 4,9 \text{ m/s}^2} = 5,80 \text{ s}$$

La gittata massima  $L$  percorsa dall'elemento rotante distaccatosi dall'aerogeneratore nelle condizioni più sfavorevoli risulta quindi:

$$L = V_x * (T_{\max} + T_y) + x_0 = 210 \text{ m}$$

## 6 Considerazioni aggiuntive e valutazione conclusiva

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.

A questo riguardo, studi condotti da Vestas<sup>2</sup> attestano 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 considerando le sole forze inerziali ed escludendo l'attrito. Sotto tale ipotesi la gittata sarebbe stimabile in circa 169 m (20% in meno rispetto al caso ideale).

D'altro canto, si osserva che la distanza calcolata è riferita alla traiettoria del suo baricentro e, pertanto, la stessa andrebbe cautelativamente incrementata dei 2/3 della lunghezza della pala, ossia di circa 56 metri nell'ipotesi che l'impatto a terra avvenga, per effetto delle rotazioni, “di piatto”.

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 *Vestas Enventus V172-6.5 MW* che si distacchi dal mozzo in condizioni nominali di funzionamento, sia di circa 224 metri.

Con riferimento alle condizioni insediative dell'area di intervento, contraddistinte dalla locale presenza di fabbricati di supporto alle attività agricole, deve evidenziarsi l'assenza di edifici stabilmente occupati da persone entro la distanza indicata rispetto alla prevista ubicazione degli aerogeneratori.

---

<sup>2</sup> “Blade throw calculation under normal operating conditions” VESTAS AS Denmark July 2001