



# REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

## PROVINCE DI NUORO E SASSARI



COMUNE DI BITTI



COMUNE DI BUDDUSO



### PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO "BITTI - TERENCESS"

Potenza complessiva 56 MW

### PROGETTO DEFINITIVO DELL'IMPIANTO, DELLE OPERE CONNESSE E DELLE INFRASTRUTTURE INDISPENSABILI

**RS.7**

### CALCOLO SULLA GITTATA ELEMENTI ROTANTI

COMMITTENTE

**GREEN  
ENERGY  
SARDEGNA 2  
S.r.L.**

**Piazza del Grano 3  
39100 Bolzano, Italia**

### GRUPPO DI LAVORO

Ing. Giorgio Floris: Coordinatore e progettista opere civili, elettriche e sottostazione

Ing. Matteo Floris: Collaborazione progettazione parte civile, elettrica e sottostazione

Geom. Francesco Troncia: rilievi, elaborazioni grafiche e progettazione

Dott. Geol. Fausto Pani: relazione paesaggistica - Sia - studio geologico  
simulazioni fotografiche

Dott. Maurizio Medda: relazione faunistica e piano di monitoraggio faunistico

Dott. Agr. Paolo Callioni - Dott. For. Carlo Poddi:

relazione pedo agronomica e vegetazionale

Dott. For. Carlo Poddi: relazione impatto acustico ante operam e bassa frequenza

Dott.ssa Archeo. Giuseppina Manca di Mores: relazione archeologica

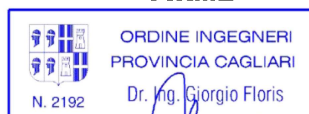
Ing. Vincenzo Pinna: calcoli strutturali

Ing. Michele Losito, consulente scientifico Prof. Gianluca Gatto:  
relazione sui principali ponti radio nell'area del parco

Ce.Pi.Sar.: piano monitoraggio chiroterteri

SCALA:

FIRME



Rev.	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato	Data
00	Prima emissione				Luglio 2020



## **REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

**Comuni di Bitti (Nuoro), Onanì (Nuoro) e Buddusò (Sassari)**

### **GREENENERGYSARDEGNA2**

**Green Energy Sardegna 2 Srl**

Piazza del Grano 3, Bolzano, P.IVA e Cod. Fisc. 02993950217

## **PROGETTO DEL PARCO EOLICO "Bitti - Terenass" da 56 MW DELLE OPERE CONNESSE E DELLE INFRASTRUTTURE INDISPENSABILI**

### **RELAZIONE SULLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI**



## INDICE

1	PREMESSA .....	3
2	IPOTESI DI CALCOLO .....	3
3	CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE DI PROGETTO .....	3
4	CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO DELLA PALA .....	4
4.1	CALCOLO DELLA POSIZIONE DEL BARICENTRO.....	6
4.2	CALCOLO DELLA VELOCITÀ PERIFERICA .....	6
4.3	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA .....	7



## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla valutazione in prima approssimazione della gittata massima della pala dell'aerogeneratore nel caso di improvviso e accidentale distacco dal rotore dell'aerogeneratore di progetto. Nel calcolo ci si è posti nell'ipotesi di distacco della pala nel punto di serraggio sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per evidente effetto di intaglio dovuto al collegamento. Lo studio riporta inoltre il calcolo della gittata nell'ipotesi di rottura dell'intera pala considerando un angolo di lancio variabile. Con riferimento alla rottura della pala e all'angolo per cui si ha la maggiore gittata, si riporteranno i passaggi del calcolo della gittata al fine di giustificare il valore massimo ottenuto.

## 2 IPOTESI DI CALCOLO

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo sono le più gravose possibili in modo da giungere a risultati ampiamente cautelativi.

Per il calcolo della gittata massima si sono fatte le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema considerato è quello di un sistema rigido non vincolato (modello che approssima la pala nel momento del distacco);
- il calcolo della gittata è stato determinato per diversi valori dell'angolo  $\theta$ ;
- la velocità massima del rotore sarà limitata elettronicamente.

Verranno inoltre analizzate situazioni critiche che riguardano il distacco della pala integra dall'aerogeneratore, quindi senza che essa subisca una rottura parziale. Questo tipo di approccio semplifica moderatamente il problema ma garantisce una buona verosimiglianza del calcolo, poiché non potendo prevedere la forma né le dimensioni del pezzo che potrebbe staccarsi dalla pala ogni ipotesi in merito potrebbe generare scenari non del tutto attendibili. Va inoltre tenuto presente che il sistema di controllo della turbina comprende dei sensori che in caso di vibrazioni anomale della pala procede al blocco della turbina stessa, per cui la situazione di rottura parziale della pala è altamente improbabile.

## 3 CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE DI PROGETTO

Richiamando quanto detto nella relazione generale a proposito delle caratteristiche tecnico/prestazionali dei modelli di aerogeneratore proposti, il calcolo della gittata della pala è stato eseguito per entrambi i modelli (Vestas V162-119 m HH-5.6 MW e Siemens-Gamesa SG170-115 m HH-6.2 MW) e di seguito si riporta lo sviluppo del calcolo nel caso più sfavorevole ovvero quello relativo al modello di aerogeneratore **Siemens-Gamesa SG170-115 m HH-6.2 MW**, avente le seguenti specifiche:

### Rotore

- Altezza mozzo: 115 m
- Diametro: 170 m



- Area spazzata: 22.698 m<sup>2</sup>
- Velocità di rotazione massima: 10,6 giri/min
- Numero pale: 3
- Lunghezza pala: 83,5 m
- Posizione del baricentro della pala: 1/3 della lunghezza a partire dalla radice

#### Condizioni di funzionamento

- Velocità di cut-in 3 m/s
- Velocità di cut-out 25 m/s

## 4 CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO DELLA PALA

Nel presente paragrafo viene descritta la legge del moto utilizzata per il calcolo della gittata.

Il moto della pala verrà assimilato a quello di un proiettile. Con lo studio del moto di quest'ultimo si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni che interessano i corpi che vengono lanciati (o ad esempio urtano) con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante e che compiono un moto parabolico. Chiaramente la resistenza dell'aria non è assolutamente trascurabile.

Infatti, più il corpo è grande, più la resistenza dell'aria (o di un altro fluido) influisce sulle variabili del moto (gittata, altezza massima, tempo di caduta). Una caratteristica importante della resistenza aerodinamica dei fluidi è che essa dipende dalla velocità: più veloci sono gli oggetti più grande è la resistenza dei fluidi nei quali si muovono. Tale premessa è utile per ritenere non trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto.

Nel caso di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono la prima e la seconda equazione della dinamica, che in forma vettoriale si scrivono:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{g} = \mathbf{M}\mathbf{a}_g$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Supponendo di concentrare tutto il peso nel centro di massa G della pala, il momento della forza peso è nullo (avendo scelto G come polo per il calcolo dei momenti). Pertanto, la seconda equazione ci dice che il corpo lungo la traiettoria percorsa gira indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione al problema è quindi data dalla risoluzione della prima equazione. Questa evidenzia che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme descrivendo la caratteristica curva parabolica.

Come noto, il moto di un proiettile si può pensare come la composizione di due moti, uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato con accelerazione di modulo  $g$  in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita dal corpo ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato il proiettile (con



velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo.

Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) si è utilizzato il sistema di riferimento cartesiano  $xy$  rappresentato nella figura seguente.

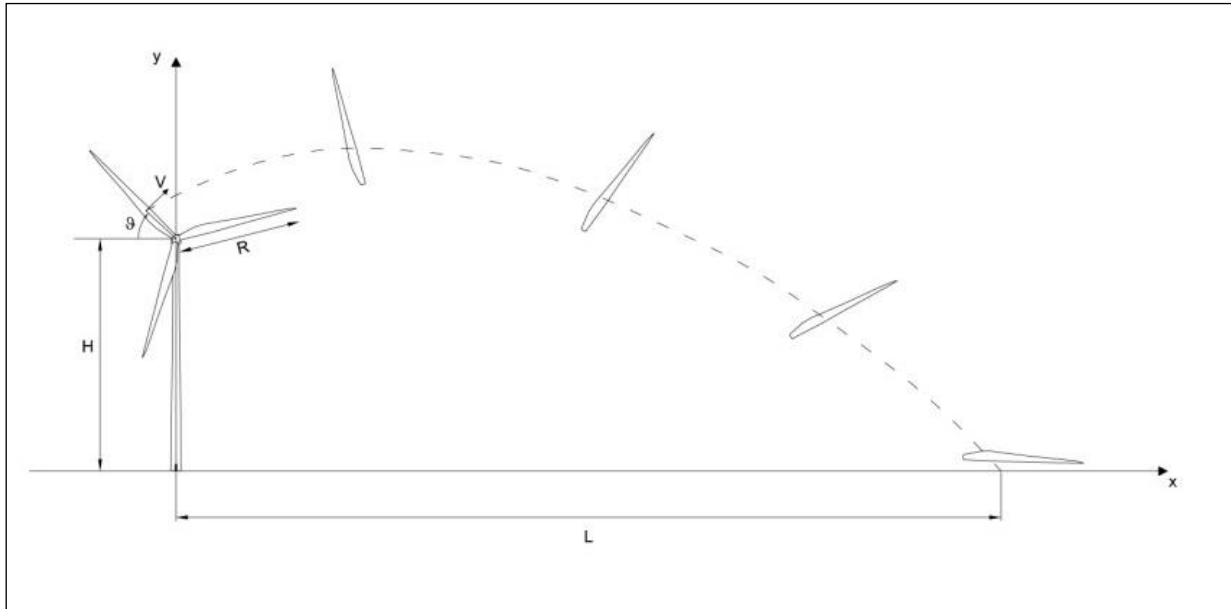


Fig. 1

Supponendo, come detto, di concentrare la massa della pala nel baricentro e trascurando il moto rotazionale della pala durante il volo, le equazioni del moto del baricentro sono quelle di un punto materiale soggetto alla sola forza di gravità:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 0 \\ \ddot{y} &= -g\end{aligned}$$

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

La legge del moto soluzione di queste equazioni è:

$$\begin{aligned}x(t) &= x_0 + v_x t \\ y(t) &= y_0 + v_y t - \frac{1}{2} g t^2\end{aligned}$$

dove  $(x_0, y_0)$  è la posizione iniziale del punto materiale nel sistema di riferimento indicato e  $(v_x, v_y)$  è la sua velocità. La traiettoria del punto intercetta il suolo al tempo  $T$  per cui si ha  $y(T) = 0$ .

Dalla legge del moto si ottiene:

$$T(y=0) = -\frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0 g}$$

avendo scartato la soluzione corrispondente a tempi negativi.



La posizione e la velocità sono determinati dall'angolo  $\vartheta$  e dalla velocità tangenziale  $V$  del baricentro della pala al momento del distacco. Come si vede dalla figura 1, essi sono legati alla posizione e alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$\begin{aligned}x_0 &= -R_G \cos \vartheta \\y_0 &= H + R_G \sin \vartheta \\v_x &= V \sin \vartheta \\v_y &= V \cos \vartheta\end{aligned}$$

avendo indicato con  $R_G$  la distanza del baricentro  $G$  della pala dal punto di attacco della pala stessa.

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

Dalla legge di moto otteniamo:

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per  $T$  ricavata sopra, otteniamo la gittata  $L$  in funzione di  $V$  e di  $\vartheta$ :

$$L = \frac{V \sin \vartheta}{g} \left[ V \cos \vartheta + \sqrt{V^2 \cos^2 \vartheta + 2(H + R_G \sin \vartheta)g} \right] - R_G \cos \vartheta \quad (1)$$

Prima di effettuare il calcolo della gittata, calcoliamo i parametri che ci serviranno per il prosieguo dello stesso.

#### 4.1 CALCOLO DELLA POSIZIONE DEL BARICENTRO

Date le caratteristiche geometriche della pala e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, possiamo ritenere con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, cioè ad  $R_G = 1/3 L_{\text{pala}} = \mathbf{27,83 \text{ m}}$  per l'aerogeneratore di progetto (essendo  $L_{\text{pala}} = 83,5 \text{ m}$ ).

#### 4.2 CALCOLO DELLA VELOCITÀ PERIFERICA

La velocità angolare media  $\omega$  è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. Indicando con  $n$  il numero di giri al minuto compiuti dal corpo in movimento circolare e tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$  radianti, per  $n$  giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare  $\omega$  al minuto del corpo in movimento. Il dato di partenza è  $\mathbf{n = 10,6 \text{ giri/min}}$  (vedi par. 3), che corrisponde ad una velocità angolare:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 1,11 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La velocità  $V$  del baricentro  $G$  si ricaverà quindi dalla relazione:

$$V = \omega \cdot R_G$$



cioè:

$$V = \omega \cdot R_G = \frac{2\pi n}{60} R_G = 30,89 \frac{m}{s}$$

### 4.3 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Sostituendo allora nella (1) i valori di  $R_G$  e  $V$  sopra determinati e l'altezza del mozzo  $H = 115$  m, possiamo riportare in una tabella i valori della gittata  $L$  in funzione dell'angolo  $\theta$ . Si ottiene così la tabella 1:

$\theta$ [°]	$\theta$ [rad]	sen $\theta$	cos $\theta$	L (m)
0	0,00	0,00	1,00	-27,83
5	0,09	0,09	1,00	-3,63
10	0,17	0,17	0,98	20,53
15	0,26	0,26	0,97	44,17
20	0,35	0,34	0,94	66,85
25	0,44	0,42	0,91	88,15
30	0,52	0,50	0,87	107,71
35	0,61	0,57	0,82	125,24
40	0,70	0,64	0,77	140,49
45	0,79	0,71	0,71	153,32
50	0,87	0,77	0,64	163,64
55	0,96	0,82	0,57	171,44
60	1,05	0,87	0,50	176,77
65	1,13	0,91	0,42	179,76
70	1,22	0,94	0,34	180,57
75	1,31	0,97	0,26	179,43
80	1,40	0,98	0,17	176,56
85	1,48	1,00	0,09	172,24
90	1,57	1,00	0,00	166,70
95	1,66	1,00	-0,09	160,19
100	1,75	0,98	-0,17	152,96
105	1,83	0,97	-0,26	145,20
110	1,92	0,94	-0,34	137,08
115	2,01	0,91	-0,42	128,76
120	2,09	0,87	-0,50	120,36
125	2,18	0,82	-0,57	111,95
130	2,27	0,77	-0,64	103,62
135	2,36	0,71	-0,71	95,41
140	2,44	0,64	-0,77	87,33
145	2,53	0,57	-0,82	79,42
150	2,62	0,50	-0,87	71,67
155	2,71	0,42	-0,91	64,08
160	2,79	0,34	-0,94	56,62
165	2,88	0,26	-0,97	49,30
170	2,97	0,17	-0,98	42,07
175	3,05	0,09	-1,00	34,93
180	3,14	0,00	-1,00	27,83

Tabella 1 – Calcolo gittata massima





La gittata massima si ottiene per  $\theta = 70^\circ$  ed il relativo valore è pari a **180,57 m**; questo valore rappresenta il valore della gittata massima per il distacco della pala in corrispondenza del mozzo. Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene il punto più lontano di caduta pari a valore massimo di gittata incrementato dei 2/3 della lunghezza della pala, ovvero:

<b>Distanza punto massima caduta: <math>180,57 \text{ m} + 55,67 \text{ m} = 236,24 \text{ m}</math></b>
--

Come già anticipato al precedente paragrafo 3, tale calcolo è stato condotto anche per il modello di aerogeneratore Vestas V162-119 m HH-5.6 MW per il quale la distanza del punto di massima caduta risulta pari a 199,09 metri.

Si rimanda alla tavola grafica allegata in calce alla presente relazione la rappresentazione grafica della superficie a terra all'interno della quale si ottiene il punto di caduta della pala.

Ing. Giorgio Floris



**Area gittata massima elementi rotanti**  
**Scala 1:25000**

