



Green Power

Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.C.73.IT.W.17279.00.014.01

PAGE

1 di/of 15

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

# IMPIANTO EOLICO GREENFIELD "SANLURI-SARDARA"

## PROGETTO DEFINITIVO

### Relazione gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale

File: GRE.EEC.C.73.IT.W.17279.00.014.01 - Relazione gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale.docx

REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED
00	09/02/2024	Seconda emissione	A.Ottoboni	G. Alfano	P. Polinelli
00	19/05/2022	Prima emissione	M. Carnevale	G. Alfano	P. Polinelli

#### GRE VALIDATION

EGP

COLLABORATORS

VERIFIED BY

VALIDATED BY

PROJECT / PLANT

Sanluri-Sardara

#### GRE CODE

GROUP	FUNCION	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT	SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISION										
GRE	EEC	C	7	3	I	T	W	1	7	2	7	9	0	0	0	1	4	0	1

CLASSIFICATION

**PUBLIC**

UTILIZATION SCOPE

**BASIC DESIGN**

This document is property of Enel Green Power Spa It is strictly forbidden to reproduce this document, in whole or in part, and to provide to others any related information without the previous written consent by Enel Green Power Spa.

## INDEX

1. INTRODUZIONE .....	3
1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE .....	3
1.2. CONTENUTI DELLA RELAZIONE .....	3
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....	4
3. GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO .....	6
4. ANALISI STORICA DEGLI INCIDENTI .....	7
5. ROTTURA PALA E CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA.....	8
5.1. INTRODUZIONE E IPOTESI ALLA BASE DEL MODELLO DI CALCOLO .....	8
5.2. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO .....	9
5.3. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA.....	10
5.4. RISULTATI .....	12
6. CONCLUSIONI .....	14

## 1. INTRODUZIONE

Stantec S.p.A., in qualità di Consulente Tecnico, è stata incaricata da Marte Srl di redigere il progetto definitivo per la costruzione di un nuovo impianto eolico denominato "Sanluri-Sardara" ubicato nei comuni di Sardara, Sanluri e Villanovaforru, che si trovano in provincia di Sud Sardegna. Una piccola porzione della Stazione Elettrica di Terna, alla quale sarà connesso l'impianto eolico in progetto, ricade nel comune di Furtei, provincia di Sud Sardegna.

Il progetto proposto prevede l'installazione di 12 nuove turbine eoliche ciascuna di potenza nominale fino a 6 MW, in linea con gli standard più alti presenti sul mercato, per una potenza installata totale fino a 72 MW.

L'energia prodotta dagli aerogeneratori, attraverso il sistema di cavidotti interrati in media tensione, verrà convogliata ad una stazione di trasformazione 33/36 kV di nuova realizzazione, all'interno del comune di Sanluri, e poi da qui convogliata alla futura Stazione Elettrica (SE) a 380/150 kV della RTN da inserire in entra - esce alla linea RTN a 380 kV "Ittiri - Selargius", situata nei comuni di Sanluri e Furtei.

In aggiunta alla stessa sottostazione sarà connesso un sistema di accumulo elettrochimico BESS (Battery Energy Storage System) da 35 MW, per un totale di capacità di stoccaggio pari a 280 MWh.

Il progetto è in linea con gli obiettivi nazionali ed europei per la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, legate a processi di produzione di energia elettrica.

Si precisa che il progetto della stazione elettrica SE "Sanluri" e dei relativi raccordi aerei è stato oggetto di un'altra iniziativa, proposta dalla società GREENENERGYSARDEGNA2 e sviluppata dalla società di ingegneria GEOTECH S.r.l.. Il progetto è stato sottoposto per l'approvazione al gestore di rete Terna S.p.a. e ha ottenuto il benestare tecnico.

La revisione del progetto riguarda la modifica della posizione della turbina V01 e relative piazzola e strada di accesso, del sistema BESS, della SSE e della SE di Terna. Le modifiche sulla turbina V01, BESS e SSE derivano dalla volontà del Proponente di ridurre al minimo l'interferenza con le aree tutelate; lo spostamento della Stazione Elettrica 150/380 kV "Sanluri" e dei relativi raccordi aerei deriva da una specifica richiesta di Terna al fine di contenere, il più possibile, i movimenti scavo-riporti necessari alla costruzione della Stazione Elettrica.

### 1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE

Marte Srl., in qualità di soggetto proponente del progetto, è una società del Gruppo Enel che si occupa dello sviluppo e della gestione delle attività di generazione di energia da fonti rinnovabili facente capo a Enel Green Power Spa.

Il Gruppo Enel, tramite la controllata Enel Green Power Spa, è presente in 28 Paesi nei 5 continenti con una capacità gestita di oltre 46 GW e più di 1200 impianti.

In Italia, il parco di generazione di Enel Green Power è rappresentato dalle seguenti tecnologie rinnovabili: idroelettrico, eolico, fotovoltaico, geotermia. Attualmente nel Paese conta una capacità gestita complessiva di oltre 14 GW.

### 1.2. CONTENUTI DELLA RELAZIONE

La presente relazione riporta la valutazione della gittata massima che si ottiene attraverso il moto percorso da una pala distaccatasi dall'aerogeneratore.

Il capitolo 2 descrive in generale il sito e il layout degli aerogeneratori di nuova costruzione.

Il capitolo 3 descrive in generale le caratteristiche tecniche e costruttive di un aerogeneratore moderno di grossa taglia ed espone brevemente il suo funzionamento.

Nel capitolo 4 è riportata una breve analisi storica e statistica degli incidenti sugli aerogeneratori, focalizzato sulle pale.

Il capitolo 5 affronta il metodo di calcolo della gittata massima, mentre nel capitolo 6 sono riportate le conclusioni con riferimento alle posizioni degli aerogeneratori di nuova costruzione in sito.

## 2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il sito si trova nella provincia di Sud Sardegna ed interessa il territorio dei comuni di Villanovaforru, Sardara e Sanluri.

L'area è identificata dalle seguenti coordinate geografiche:

- Latitudine: 39°35'49,84"N
- Longitudine: 8°52'32,16"E

L'impianto in progetto ricade all'interno dei seguenti fogli catastali:

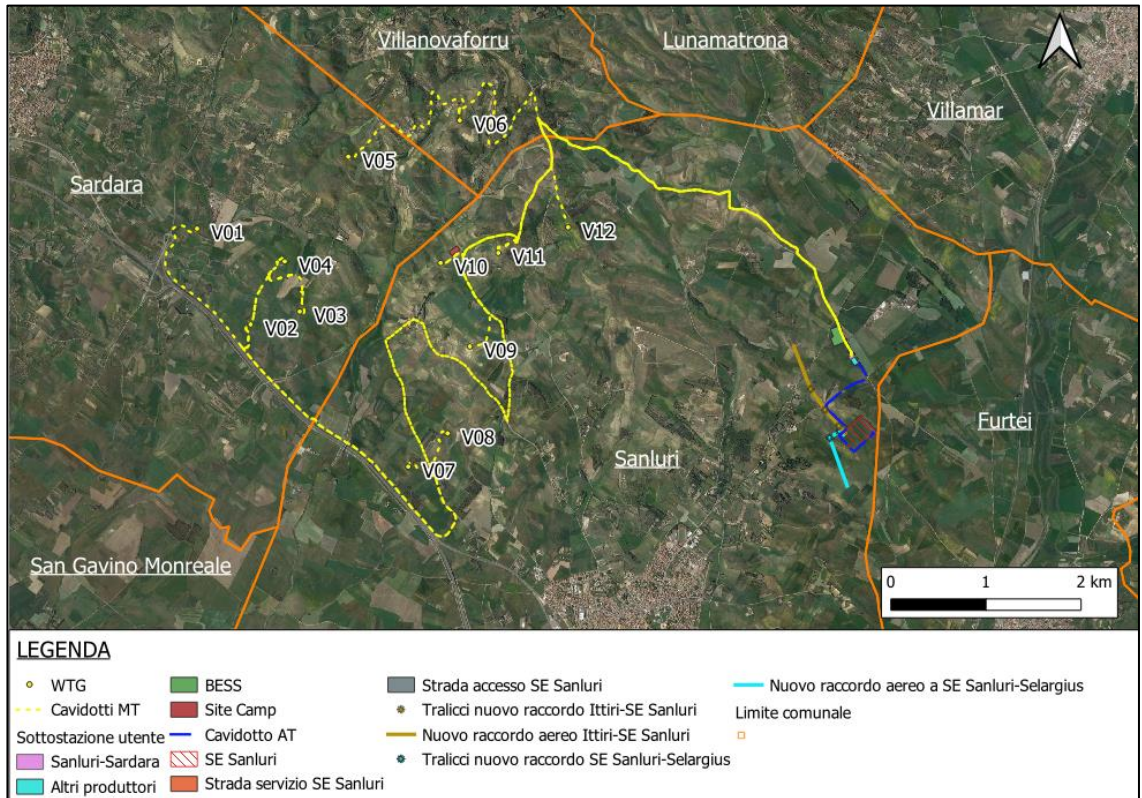
- Comune di Sanluri: n° 1, n° 2, n° 3, n° 4, n° 5, n° 7, n° 8, n° 11, n° 12, n° 13, n° 14, n° 17, n° 19, n°22
- Comune di Sardara: n° 31, n° 43, n° 44, n° 45, n° 58, n° 59
- Comune di Villanovaforru: n° 10, n° 11, n° 12, n° 14, n° 15, n° 16
- Comune di Furtei: n° 5

L'area di progetto ricade all'interno dei fogli I.G.M. in scala 1:25.000 codificati 225-I-NE, denominato "Lunamatrona" e 225-I-SE denominato "Sanluri".

Di seguito è riportato l'inquadramento territoriale dell'area di progetto e la posizione degli aerogeneratori su ortofoto.



Figura 2-1: Inquadramento generale dell'area di progetto.



**Figura 2-2: Configurazione proposta su ortofoto.**

Si riporta invece in formato tabellare un dettaglio sulla localizzazione delle WTG di nuova costruzione, in coordinate WGS84 UTM fuso 32 N:

**Tabella 1: Coordinate aerogeneratori**

ID	Comune	Est [m]	Nord [m]	Altitudine [m s.l.m.]
V01	Sardara	486759	4383418	157
V02	Sardara	487322	4382411	160
V03	Sardara	487838	4382546	186
V04	Sardara	487680	4383073	193
V05	Sardara	488349	4384173	265
V06	Villanovaforru	489520	4384555	287
V07	Sanluri	488979	4380917	157
V08	Sanluri	489393	4381267	187
V09	Sanluri	489627	4382180	229
V10	Sanluri	489319	4383057	236
V11	Sanluri	489926	4383162	283
V12	Sanluri	490660	4383432	297



### 3. GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO

Un aerogeneratore (o turbina eolica) è, in generale, costituito dai seguenti sottosistemi principali:

- il rotore eolico, che trasforma l'energia cinetica del vento in energia meccanica mediante alcune pale, opportunamente sagomate secondo un profilo aerodinamico e montate su un asse orizzontale o verticale rispetto al terreno;
- l'apparato di conversione dell'energia meccanica in energia elettrica, basato su un generatore elettrico rotante azionato dal rotore eolico attraverso un sistema di trasmissione, che spesso comprende un moltiplicatore di giri per ottenere la velocità appropriata per il generatore;
- il convertitore statico di frequenza e tensione, se necessario per ottenere una potenza elettrica con caratteristiche diverse da quelle in uscita dal generatore ed appropriate all'impiego.

Nelle macchine ad asse orizzontale, come quelle dell'impianto eolico oggetto della presente relazione, il rotore ha di norma tre pale, generalmente costruite in vetroresina con eventuali rinforzi in fibra di carbonio. Le pale sono a passo variabile, cioè il loro angolo di calettamento al mozzo può essere variato da un servomeccanismo comandato dal sistema di controllo dell'aerogeneratore. Gli aerogeneratori ad asse orizzontale comprendono, oltre al rotore, i seguenti componenti strutturali principali:

- la navicella o gondola, in cui sono alloggiati gli alberi di trasmissione, il moltiplicatore di giri, il generatore, eventuali altri componenti elettrici e le apparecchiature ausiliarie e di controllo; la navicella viene orientata dal sistema di controllo per mantenere l'asse del rotore allineato alla direzione del vento;
- il sostegno, generalmente metallico con struttura tubolare o a traliccio, che ha la funzione di mantenere il rotore ad un'altezza opportuna rispetto al suolo (la velocità del vento tende ad aumentare con l'altezza) e appoggia, a sua volta, su una fondazione in calcestruzzo armato.

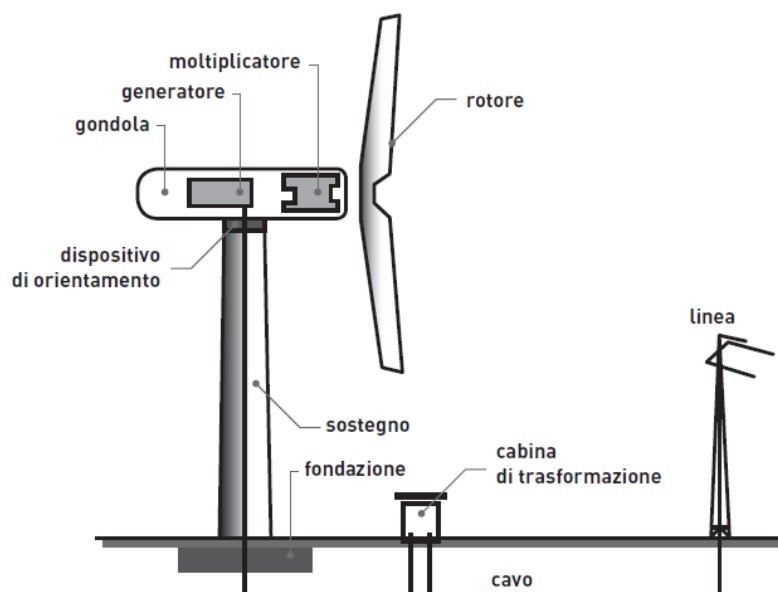


Figura 3-1: Elementi tipici di un aerogeneratore

La figura successiva mostra un dettaglio del rotore e della navicella:



**Figura 3-2: Caratteristiche dettagliate dei componenti presenti in una turbina eolica**

Il meccanismo di funzionamento della macchina è il seguente: la vena fluida impatta contro le pale della turbina, azionando il moto rotatorio del rotore. Quest'ultimo, che è calettato al generatore elettrico attraverso l'albero lento, il moltiplicatore di giri e l'albero veloce, trasferisce l'energia cinetica al generatore, il quale a sua volta la converte in energia elettrica.

Il trasformatore presente in navicella innalza la tensione dell'energia prodotta e attraverso un sistema di cavidotti l'energia prodotta viene immessa nella rete elettrica nazionale.

#### 4. ANALISI STORICA DEGLI INCIDENTI

Diversi studi<sup>1</sup> condotti a livello internazionale tra il 1990 e il 2014 hanno evidenziato che la probabilità di guasto di una pala in un anno è compresa tra lo 0,1% e lo 0,7%. La variabilità dei dati è dovuta al differente numero di campioni, a differenti tassi di guasto e differenti ore di manutenzione dovute alla rottura.

Inoltre, uno studio<sup>2</sup> americano del 2013, effettuato su un campione di circa 10,000 aerogeneratori, caratterizzati dall'essere operativi da anni diversi, ha evidenziato che circa il 2% delle turbine (nei 10 anni di funzionamento) richiedono la sostituzione della pala, considerando però anche tutte le sostituzioni che avvengono nei primi due anni di funzionamento dovute a problemi durante il trasporto e la costruzione.

Lo studio evidenzia inoltre che la causa maggiore di rottura delle pale è dovuta all'impatto con i fulmini.

<sup>1</sup> Branner K., Ghadirian A., "Database about blade faults", 2014

<sup>2</sup> Lantz E. (NREL), "Operations Expenditures: Historical Trends And Continuing Challenges", 2013

## 5. ROTTURA PALA E CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

In questa sezione vengono riportate un'introduzione alla problematica della rottura di pala, le specifiche dell'aerogeneratore di riferimento e infine il calcolo della gittata massima.

### 5.1. INTRODUZIONE E IPOTESI ALLA BASE DEL MODELLO DI CALCOLO

La rottura improvvisa di una pala dell'aerogeneratore (o di un frammento di essa) è un fattore molto importante da analizzare in fase di progettazione e per la localizzazione dell'impianto eolico.

La rottura di una pala, che spesso avviene alla radice di essa, è un evento che ha due cause principali:

1. Rottura del giunto di collegamento tra mozzo e pala;
2. Fenomeni di fatica sul profilo di pala causati dalla discontinuità della struttura.

Lo studio in oggetto ha lo scopo di analizzare, nell'eventualità che si verifichi il distacco di una pala, il moto di caduta da essa percorsa.

A differenza di un classico moto parabolico (es. moto del proiettile), in cui è possibile definire che l'angolo a cui vi è la gittata massima è  $45^\circ$ , la complessa struttura geometrica ed aerodinamica della pala porta a dover studiare in modo più approfondito il fenomeno del distacco di pala.

Di seguito, vengono riportate alcune definizioni ed ipotesi utili per la definizione e il calcolo della gittata massima, affrontato nei paragrafi successivi:

- **Gittata (L):** è la distanza percorsa lungo l'asse delle ascisse da un corpo lasciato in aria. Essa dipende fortemente dall'angolo di distacco, dalle caratteristiche della pala come dimensione, peso e profilo aerodinamico, dalla velocità di rotazione del corpo, dalla velocità del vento e dalle forze di attrito che agiscono sulla pala durante il volo.
- **Tempo di volo (T):** è l'intervallo di tempo che intercorre tra il distacco del corpo ed il suo arrivo al suolo (il tempo trascorso in aria). Come definito per la gittata, esso dipende dalle caratteristiche della pala, dall'angolo di distacco e dalla velocità di rotazione del corpo.

Il calcolo della gittata massima dell'aerogeneratore necessita, inoltre, di alcune ipotesi semplificative, necessarie a descrivere il modello del moto parabolico:

- Viene considerato il distacco della totalità della pala in modo istantaneo. Questa ipotesi è assolutamente conservativa, dato che non si considera la resistenza posta dalla pala;
- Viene considerata la rotazione massima (massimi giri al minuto) per la turbina al momento del distacco;
- Sono considerati solamente gli effetti gravitazionali sul moto e non gli effetti di attrito di aria e vento. Questa ipotesi è conservativa, dato che trascurare gli effetti di aria e vento causa un incremento del valore della gittata massima della pala distaccata a favore di sicurezza. Gli effetti di portanza sul profilo della pala sono trascurati;
- Il moto della pala al momento del distacco è un moto complesso, che dipende strettamente dalle dimensioni della pala, dal suo peso e dalle forze aerodinamiche in gioco. Il modello teorico che meglio descrive il moto della pala è il "moto rotazionale complesso" che permette di descrivere il moto della pala tridimensionalmente. In questa analisi, trascurando gli effetti di aria e vento, il moto della pala distaccata viene descritto attraverso il movimento del punto del centro di massa (baricentro), posto ad  $1/3$  della lunghezza di pala. Tali considerazioni sono utili al fine di descrivere un moto dipendente solamente dagli effetti gravitazionali. Tale ipotesi, che non considera effetti di attrito e il moto rotazionale complesso, porta a sovrastimare il valore della gittata a favore di sicurezza;
- Non si considera alcuna mutazione della velocità del vento durante il volo. La velocità del vento durante il volo è bensì assunta pari a quella al momento del distacco e pari alla velocità massima di funzionamento.



## 5.2. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO

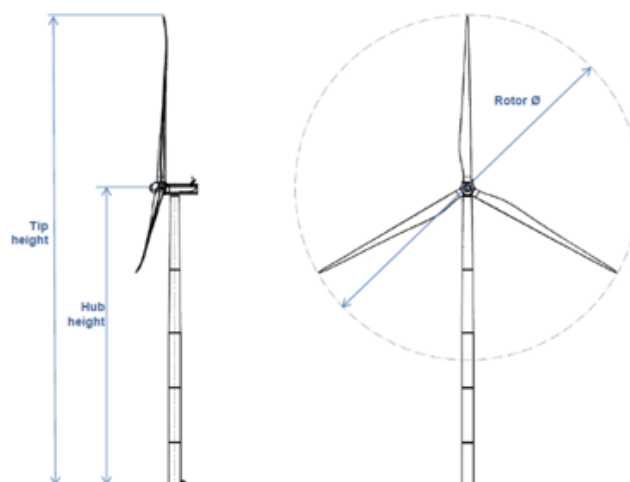
Gli aerogeneratori che verranno installati presso il nuovo impianto oggetto di questo studio saranno selezionati sulla base delle più innovative tecnologie disponibili sul mercato. La potenza nominale delle turbine previste sarà pari a massimo 6,0 MW. Il tipo e la taglia esatta dell'aerogeneratore saranno comunque individuati in seguito della fase di acquisto della macchina e verranno descritti in dettaglio in fase di progettazione esecutiva.

Si riportano di seguito le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore (in grassetto i valori necessari per il calcolo della gittata):

**Tabella 2: Caratteristiche tecniche aerogeneratore**

Potenza nominale	6,0 MW
Diametro del rotore D	170 m
<b>Lunghezza della pala <math>r_{tip}</math></b>	<b>83,5 m</b>
Corda massima della pala	4,5 m
Area spazzata	22.698 m <sup>2</sup>
<b>Altezza al mozzo <math>H_m</math></b>	<b>135 m</b>
Classe di vento IEC	IIIA
Velocità cut-in	3 m/s
Velocità nominale	10 m/s
Velocità cut-out	25 m/s
<b>Giri al minuto rotore n</b>	<b>8,8</b>

Nell'immagine seguente è rappresentata una turbina con rotore di diametro pari a 170 m e potenza fino a 6,0 MW:



Diametro rotore (Rotor $\Phi$ )	170 m
Altezza mozzo (Hub height)	135 m
Altezza massima (Tip height)	220 m

**Figura 5-1: Vista e caratteristiche di un aerogeneratore da 6,0 MW**

Un importante fattore per il calcolo della gittata massima è il raggio baricentrico ( $r_g$ ). Per il calcolo della gittata, è necessario descrivere il moto parabolico nel centro di massa del corpo. Data la disomogenea distribuzione di massa lungo la pala, una buona approssimazione è considerare che il baricentro di pala è circa a 1/3 della lunghezza di pala. Dunque, per gli aerogeneratori oggetto del presente studio, il raggio baricentrico si trova a una distanza dal centro del mozzo pari a:  $(83,5/3) + (85 - 83,5) = 29,33$  m

Nel baricentro vengono quindi descritte la velocità angolare, la velocità periferica ed il moto parabolico. Una volta individuata la gittata massima al raggio baricentrico sarà possibile individuare la gittata massima al "tip" della pala, sommando la lunghezza che vi è tra il "tip" e il raggio baricentrico.

Per il calcolo della gittata è stato ipotizzato un numero di giri pari a 8,8 rpm, valore riscontrato da dati tecnici dell'aerogeneratore.

### 5.3. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

In questo paragrafo viene riportato il calcolo della gittata massima in accordo alle ipotesi definite al paragrafo 5.1 e per l'aerogeneratore di riferimento definito al paragrafo 5.2.

Il primo passo per il calcolo della gittata massima è la descrizione delle leggi orarie del moto parabolico della pala distaccata. Considerando che la massa e la geometria sono concentrate in un punto (baricentro), che il corpo si trova in un campo di gravità uniforme ed indipendente dal tempo e che si trascurano le forze di attrito legate alla resistenza dell'aria, si applicano le seguenti equazioni di moto:

$$\begin{cases} x(t) = x_o + v_{gx}t \\ y(t) = y_o + v_{gy}t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (5.1)$$

Dove:

- $x_o$  e  $y_o$  sono le posizioni iniziali della pala al momento del distacco. Esse dipendono dall'angolo di distacco e dal raggio baricentrico;
- $v_{gx}$  e  $v_{gy}$  sono rispettivamente la componente orizzontale e verticale della velocità iniziale di distacco " $v_g$ ", definita al raggio baricentrico. La velocità di distacco " $v_g$ " si calcola a partire dalla velocità angolare " $\omega$ " (e quindi dal numero di giri al minuto della turbina " $n$ ") e dal raggio baricentrico " $r_g$ " come di seguito:

$$v_g = \omega \cdot r_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot r_g = 27,03 \text{ m/s} \quad (5.2)$$

- $g$  è la costante di gravitazione universale pari a 9,81 m/s<sup>2</sup>
- $t$  è la variabile tempo. Impostando  $y(t) = 0$  (corpo arrivato a terra), si ottiene di conseguenza il tempo di volo e la condizione in cui calcolare la gittata.

Per prima cosa, è quindi necessario definire le posizioni iniziali e le velocità del corpo distaccato. Il moto parabolico del corpo viene descritto in Figura 5-2, dove il rotore della turbina eolica (fino al raggio baricentrico) è rappresentato con il cerchio blu:

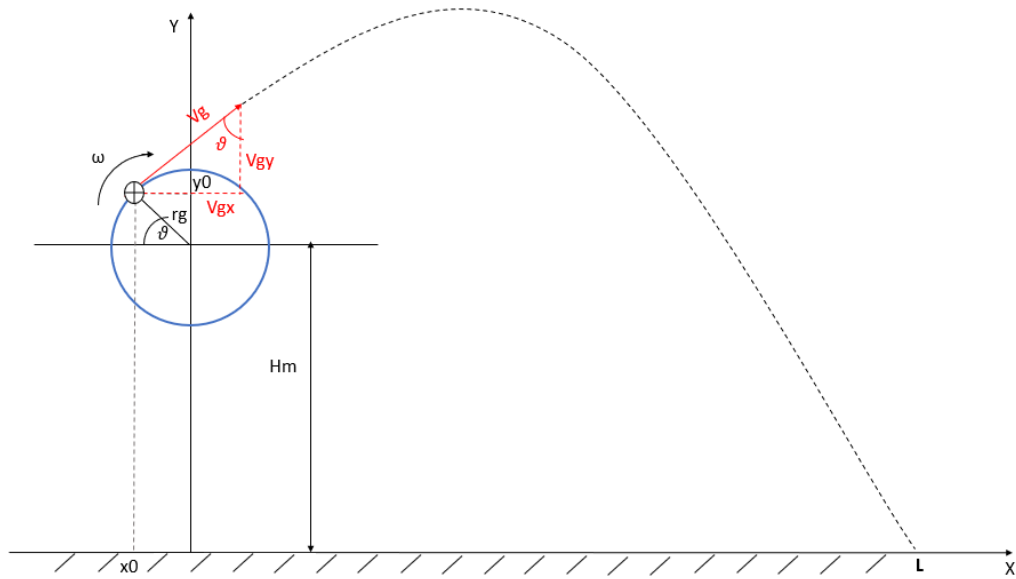


Figura 5-2: Traiettoria della pala distaccata

Come visibile dalla Figura 5-2, le posizioni iniziali ( $x_o$  e  $y_o$ ) e le componenti ( $v_{gx}$  e  $v_{gy}$ ) della velocità di distacco  $v_g$  dipendono strettamente dal raggio baricentrico  $r_g$ , dall'altezza di mozzo  $H_m$ , e dall'angolo di distacco  $\vartheta$  definito in senso orario tra l'asse della pala e l'orizzontale. Essendo l'angolo di distacco variabile nel tempo, è necessario calcolare la gittata al variare dell'angolo di distacco per evidenziare quale è la condizione in cui si ottiene la massima gittata.

Si definiscono quindi:

- Le posizioni iniziali ( $x_o$  e  $y_o$ ) come:

$$x_o = -r_g \cos \vartheta ; y_o = H_m + r_g \sin \vartheta \quad (5.3)$$

- Le componenti ( $v_{gx}$  e  $v_{gy}$ ) della velocità di distacco  $v_g$  come:

$$v_{gx} = v_g \sin \vartheta ; v_{gy} = v_g \cos \vartheta \quad (5.4)$$

Sono state quindi definite le condizioni iniziali del distacco di pala. È necessario ora, a partire dalle equazioni di moto (5.1), ottenere i valori di Tempo di volo ( $T$ ) e Gittata ( $L$ ) definiti sul baricentro della pala distaccata.

Imponendo  $y(t) = 0$  nell'equazione 5.1, condizione a cui corrisponde il raggiungimento a terra del corpo dopo il volo, e avendo definito le condizioni iniziali nelle equazioni 5.3 e 5.4, si possono calcolare quindi la gittata  $L$  e il tempo di volo  $T$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} L = x_o + v_{gx}T \\ 0 = y_o + v_{gy}T - \frac{1}{2}gT^2 \end{array} \right\} \quad (5.5)$$

Risolviendo la seconda equazione di secondo grado nella variabile  $T$  e trascurando i risultati dell'equazione che evidenziano tempi negativi, si può quindi ottenere il valore del tempo di volo  $T$ , pari a:

$$T [s] = \frac{v_{gy} + \sqrt{v_{gy}^2 + 2gy_0}}{g} = \frac{v_g \cos \vartheta + \sqrt{(v_g \cos \vartheta)^2 + 2g \cdot (H_m + r_g \sin \vartheta)}}{g} \quad (5.6)$$

Definito il tempo di volo  $T$ , dalla prima equazione (5.5), si ottiene quindi la gittata  $L$ , definita nel baricentro di pala:

$$L [m] = x_o + v_{gx}T = -r_g \cos \vartheta + v_g \sin \vartheta \cdot \left( \frac{v_g \cos \vartheta + \sqrt{(v_g \cos \vartheta)^2 + 2g \cdot (H_m + r_g \sin \vartheta)}}{g} \right) \quad (5.7)$$

Ottenuta la gittata nel baricentro di pala  $L$ , per ottenere la gittata al "tip" della pala, è sufficiente sommare la distanza tra il "tip" della pala ed il raggio baricentrico ( $2/3 r_{tip}$ ):

$$L_{tip} = L + \frac{2}{3}r_{tip} \quad (5.8)$$

Come già evidenziato, tutte le grandezze definite precedentemente dipendono dall'angolo di distacco  $\vartheta$ , variabile nel tempo. Vengono quindi riportati di seguito un riassunto delle ipotesi di calcolo ed i valori di gittata ottenuti al variare dell'angolo  $\vartheta$ , al fine di individuare la gittata massima e l'angolo a essa corrispondente.

#### 5.4. RISULTATI

I valori assunti per il calcolo della gittata nella presente analisi sono i seguenti:

- Lunghezza di Pala  $r_{tip}$ : 83,5 m;
- Altezza mozzo  $H_m$ : 135 m;
- Numero di giri  $n$ : 8,8 rpm;
- Diametro del Rotore  $D$ : 170 m;
- Raggio baricentrico  $r_g$ :  $83,5/3 + 170/2 - 83,5 = 29,33$  m (distanza tra centro mozzo e  $1/3$  della lunghezza di pala ).

Sono riportati di seguito i valori ottenuti di gittata massima, al variare dell'angolo di distacco  $\vartheta$ :

**Tabella 3: Risultati calcolo gittata massima**

Angolo di distacco $\vartheta$ [°]	Posizione iniziale baricentro		Componenti $v_g$		Tempo di Volo T [s]	Gittata L [m]	Gittata @ tip $L_{tip}$ [m]
	$x_0$	$y_0$	$v_{gx}$ [m/s]	$v_{gy}$ [m/s]			
0	-29,33	135,00	0,00	27,03	8,68	-29,33	26,33
5	-29,22	137,56	2,36	26,93	8,71	-8,70	46,97
10	-28,89	140,09	4,69	26,62	8,71	11,98	67,65
15	-28,33	142,59	7,00	26,11	8,67	32,36	88,02
20	-27,56	145,03	9,25	25,40	8,61	52,06	107,72
25	-26,59	147,40	11,42	24,50	8,52	70,76	126,43
30	-25,40	149,67	13,52	23,41	8,40	88,18	143,85
35	-24,03	151,82	15,50	22,14	8,26	104,06	159,73
40	-22,47	153,86	17,38	20,71	8,10	118,20	173,87
45	-20,74	155,74	19,11	19,11	7,91	130,46	186,13
50	-18,86	157,47	20,71	17,38	7,71	140,75	196,42
55	-16,82	159,03	22,14	15,50	7,49	149,02	204,69
60	-14,67	160,40	23,41	13,52	7,26	155,29	210,96
65	-12,40	161,59	24,50	11,42	7,02	159,61	215,28
70	-10,03	162,56	25,40	9,25	6,78	162,09	217,76
<b>75</b>	<b>-7,59</b>	<b>163,33</b>	<b>26,11</b>	<b>7,00</b>	<b>6,53</b>	<b>162,85</b>	<b>218,52</b>
80	-5,09	163,89	26,62	4,69	6,28	162,05	217,72
85	-2,56	164,22	26,93	2,36	6,03	159,86	215,53
90	0,00	164,33	27,03	0,00	5,79	156,46	212,13
95	2,56	164,22	26,93	-2,36	5,55	152,04	207,71
100	5,09	163,89	26,62	-4,69	5,32	146,76	202,43
105	7,59	163,33	26,11	-7,00	5,10	140,79	196,46
110	10,03	162,56	25,40	-9,25	4,89	134,27	189,94
115	12,40	161,59	24,50	-11,42	4,69	127,35	183,01
120	14,67	160,40	23,41	-13,52	4,50	120,12	175,78
125	16,82	159,03	22,14	-15,50	4,33	112,68	168,34
130	18,86	157,47	20,71	-17,38	4,17	105,11	160,77
135	20,74	155,74	19,11	-19,11	4,01	97,46	153,13
140	22,47	153,86	17,38	-20,71	3,87	89,79	145,46
145	24,03	151,82	15,50	-22,14	3,75	82,12	137,79
150	25,40	149,67	13,52	-23,41	3,63	74,48	130,15
155	26,59	147,40	11,42	-24,50	3,53	66,87	122,54
160	27,56	145,03	9,25	-25,40	3,43	59,31	114,97
165	28,33	142,59	7,00	-26,11	3,35	51,78	107,45
170	28,89	140,09	4,69	-26,62	3,28	44,28	99,95
175	29,22	137,56	2,36	-26,93	3,22	36,81	92,47
180	29,33	135,00	0,00	-27,03	3,17	29,33	85,00

**Dall'analisi si può evidenziare che la massima gittata si ottiene per un angolo di distacco  $\vartheta$  pari a 75° ed è pari a 218,52 m.**

Si riporta di seguito il grafico che mostra la gittata al "tip" in funzione dell'angolo di distacco:



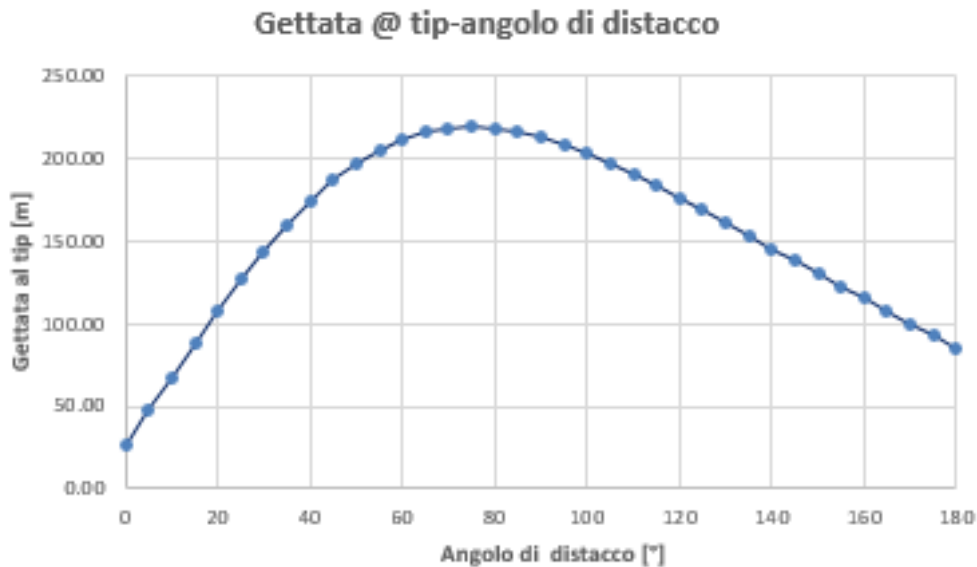


Figura 5-3: Gittata al tip vs. angolo di distacco

## 6. CONCLUSIONI

Di seguito viene riportata l'analisi degli elementi sensibili all'eventuale rottura di una pala dell'impianto in progetto.

In particolare, per ciascuna delle posizioni proposte degli aerogeneratori di nuova costruzione si riporta in tabella la distanza del ricettore sensibile "RC" più vicino (unità abitativa) e la distanza dalla strada provinciale o regionale più vicina.

**Tabella 4: Analisi gittata per recettori sensibili e strade provinciali/regionali**

WTG	Distanza da ricettore sensibile più vicino	Distanza da strada statale/provinciale/regionale più vicina
<b>V01</b>	Circa 200 m da RC 140	Circa 250 m da SP 52
<b>V02</b>	>500m	Circa 250 m da SS 131
<b>V03</b>	>500m	>500m
<b>V04</b>	Circa 450 m da RC 038	>500m
<b>V05</b>	>500m	>500m
<b>V06</b>	>500m	>500m
<b>V07</b>	Circa 470 m da RC 077	Circa 280 m da SS 131
<b>V08</b>	>500m	>500m
<b>V09</b>	>500m	>500m
<b>V10</b>	>500m	>500m
<b>V11</b>	>500m	>500m
<b>V12</b>	>500m	>500m

Come visibile dalla tabella, gli aerogeneratori V02, V03, V04, V05, V06, V07, V08, V09, V10, V11, V12 si trovano a distanze dagli elementi sensibili superiori rispetto alla gittata massima.

L'aerogeneratore V01 si trova a una distanza di circa 200m dal ricettore più vicino, inferiore rispetto alla gittata massima calcolata. Tuttavia, si segnala che tale ricettore è una struttura adibita a deposito, quindi non interessata da presenza continuativa di persone.

Si precisa che le numerose ipotesi semplificative di calcolo rispetto al caso reale causano

anche un aumento del valore reale di gittata massima.

Infine, la probabilità che il rotore, distaccandosi, percorra esattamente la direzione ottimale per l'impatto con l'elemento sensibile è molto bassa e garantisce una riduzione del rischio a priori.