

# Integrale ricostruzione dell'impianto eolico VRG-040

## Progetto definitivo

Oggetto:

**040-69 - Relazione gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale**

Proponente:

**VRG**wind 040

VRG Wind 040 S.r.l.  
Via Algardi 4  
Milano (MI)

Progettista:

 **Stantec**

Stantec S.p.A.  
Centro Direzionale Milano 2, Palazzo Canova  
Segrate (Milano)

Rev. N.	Data	Descrizione modifiche	Redatto da	Rivisto da	Approvato da
00	03/06/2022	Prima Emissione	M. Carnevale	M. Terzi	L. Lavazza
01	05/08/2022	Integrati Commenti	A. Bellisai	M. Carnevale	P. Polinelli
02	12/04/2024	Integrazioni Volontarie	V. Gionti	M. Carnevale	P. Polinelli
03	16/05/2024	Integrazioni Volontarie	V. Gionti	M. Carnevale	P. Polinelli

Fase progetto: **Definitivo**      Formato elaborato: **A4**

Nome File: **040-69.03 - Relazione gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale.docx**

# Indice

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
1.1	Descrizione del proponente .....	3
1.2	Contenuti della relazione .....	4
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>ANALISI STORICA DEGLI INCIDENTI.....</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>ROTTURA PALA E CALCOLO GITTATA MASSIMA.....</b>	<b>11</b>
5.1	Introduzione e ipotesi alla base del modello di calcolo.....	11
5.2	Aerogeneratore di riferimento .....	12
5.3	Calcolo della gittata massima.....	14
5.4	Risultati.....	16
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>19</b>

# Indice delle figure

Figura 2-1: Inquadramento territoriale dell'impianto VRG Wind 040.....	5
Figura 2-2: Inquadramento su ortofoto dell'area dell'impianto VRG-040 nel suo stato di fatto e nello stato di progetto .....	6
Figura 3-1: Elementi tipici di un aerogeneratore.....	8
Figura 3-2: Caratteristiche dettagliate dei componenti presenti in una turbina eolica .....	8
Figura 5-1: Vista e caratteristiche di un aerogeneratore da 6,0 MW .....	13
Figura 5-2: Traiettoria della pala distaccata .....	15
Figura 5-3: Gittata al tip vs. angolo di distacco .....	18

# 1 PREMESSA

Stantec S.p.A., in qualità di Consulente Tecnico, è stata incaricata da Sorgenia S.p.A. di redigere il progetto definitivo per il potenziamento dell'esistente impianto eolico ubicato nei Comuni di Campofelice di Fitalia (PA), Villafrati (PA) e Ciminna (PA), costituito da 35 aerogeneratori di potenza 0,85 MW ciascuno, con una potenza complessiva dell'impianto pari a 29,75 MW installati.

L'energia elettrica prodotta dagli aerogeneratori dell'impianto viene convogliata tramite cavidotto interrato MT da 20 kV, alla Sottostazione Utente, ubicata nel comune di Ciminna. L'allacciamento dell'impianto alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) avviene attraverso un collegamento direttamente alla Cabina Primaria di Ciminna di Enel Distribuzione, la quale a sua volta è collegata in entra-esce sulla linea esistente AT a 150 kV "Ciminna-Castronovo".

L'intervento in progetto consiste nella sostituzione delle 35 turbine eoliche dell'impianto esistente con 11 aerogeneratori di potenza nominale pari a 6 MW ciascuno. Si prevede di collegare gli 11 aerogeneratori di progetto alla Sottostazione di trasformazione MT/AT del comune di Ciminna mediante un cavo interrato MT da 33 kV. Il seguente progetto di repowering consente di aumentare notevolmente la potenza complessivamente prodotta dall'impianto, riducendo gli impatti sul territorio grazie al più ridotto numero di aerogeneratori impiegati. Inoltre, la maggior efficienza dei nuovi aerogeneratori comporta un aumento considerevole dell'energia specifica prodotta, riducendo in maniera proporzionale la quantità di CO2 equivalente.

## 1.1 Descrizione del proponente

Il soggetto proponente del progetto in esame è VRG Wind 040 S.r.l., interamente parte del gruppo Sorgenia Spa, uno dei maggiori operatori energetici italiani.

Il Gruppo è attivo nella produzione di energia elettrica con oltre 4.750 MW di capacità di generazione installata e oltre 400.000 clienti in fornitura in tutta Italia. Efficienza energetica e attenzione all'ambiente sono le linee guida della sua crescita. Il parco di generazione, distribuito su tutto il territorio nazionale, è costituito dai più avanzati impianti a ciclo combinato e da impianti a fonte rinnovabile, per una capacità di circa 370 MW tra biomassa ed eolico. Nell'ambito delle energie rinnovabili, il Gruppo, nel corso della sua storia, ha anche sviluppato, realizzato e gestito impianti di tipo fotovoltaico (ca. 24 MW), ed idroelettrico (ca. 33 MW). In quest'ultimo settore, Sorgenia è attiva con oltre 75 MW di potenza installata gestita tramite la società Tirreno Power, detenuta al 50%.

Il Gruppo Sorgenia, tramite le sue controllate, fra le quali VRG Wind 040 S.r.l., è attualmente impegnata nello sviluppo di un importante portafoglio di progetti rinnovabili di tipo eolico, fotovoltaico, biometano, geotermico ed idroelettrico, caratterizzati dall'impiego delle Best Available Technologies nel pieno rispetto dell'ambiente.

## 1.2 Contenuti della relazione

Il presente documento costituisce revisione dell'elaborato depositato in fase di prima istanza per una modifica di layout sopraggiunta a seguito di approfondimenti sulle caratteristiche ed il rischio geomorfologico del sito che hanno portato ad una ottimizzazione della localizzazione degli aerogeneratori e delle relative opere, volta a garantire la stabilità idrogeomorfologica dei versanti, nonché alla minimizzazione dell'entità di scavi e riporti.

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 in cui è ubicato il parco eolico oggetto di Repowering, denominato VRG-040, è collocato nei comuni di Villafrati, Ciminna, Campofelice di Fitalia e Mezzojuso, nella provincia di Palermo, in Sicilia.

L'impianto VRG-040 è localizzato a circa 30 km a Sud dal capoluogo, a 2 km in direzione Sud-Est rispetto al centro urbano del Comune di Villafrati ed a 0,8 km in direzione Sud/Sud-Ovest rispetto al centro storico di Campofelice di Fitalia.



**Figura 2-1: Inquadramento territoriale dell'impianto VRG Wind 040.**

L'impianto eolico VRG-040 è situato in una zona prevalentemente collinare non boschiva caratterizzata da un'altitudine media pari a circa 700 m, ma con rilievi montuosi non trascurabili, con sporadiche formazioni di arbusti e la presenza di terreni seminativi/incolti.

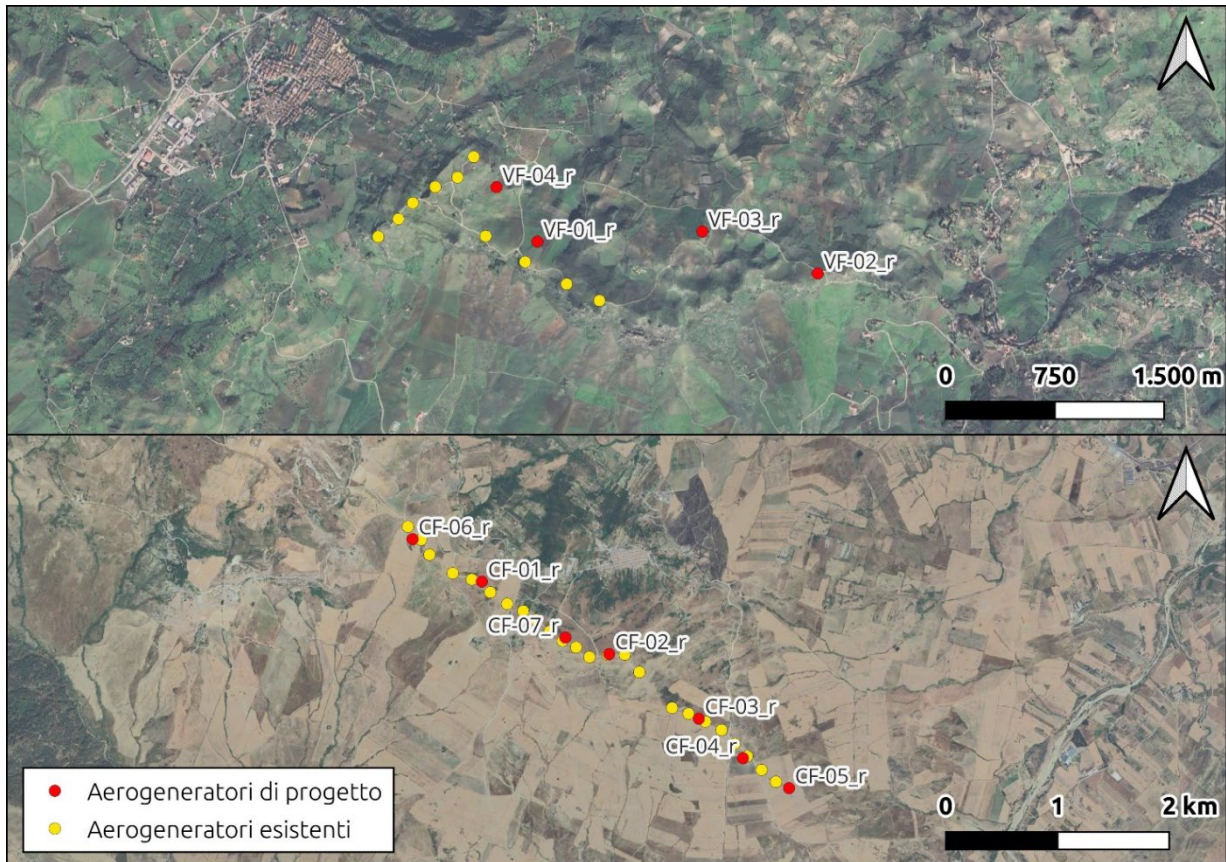
Gli aerogeneratori di progetto ricadono all'interno dei seguenti fogli catastali:

- Fogli 5, 8, 11, 13 nel comune di Campofelice di Fitalia;
- Fogli 15, 16, 17, 18 nel comune di Villafrati;
- Foglio 28 nel comune di Mezzojuso.

L'intervento di integrale ricostruzione e potenziamento dell'impianto consiste nello smantellamento dei 35 aerogeneratori esistenti e la relativa sostituzione con 11 turbine eoliche di potenza ed efficienza maggiore.



In Figura 2-2 è riportato l'inquadratura territoriale dell'area nel suo stato di fatto e nel suo stato di progetto, con la posizione degli aerogeneratori su ortofoto.



**Figura 2-2: Inquadratura su ortofoto dell'area dell'impianto VRG-040 nel suo stato di fatto e nello stato di progetto. In evidenza i settori nei comuni di Villafrati (sopra) e Campofelice di Fitalia (sotto).**

Si riporta in formato tabellare un dettaglio sulla localizzazione delle turbine eoliche di nuova costruzione, in coordinate WGS84 UTM fuso 33 N:

**Tabella 1: Localizzazione geografica degli aerogeneratori di nuova costruzione.**

ID	Comune	Est [m]	Nord [m]
VF-01_r	Villafrati	368426	4195457
VF-02_r	Villafrati	370351	4195239
VF-03_r	Villafrati	369560	4195527
VF-04_r	Villafrati	368145	4195831
CF-01_r	Mezzojuso	365474	4187475
CF-02_r	Campofelice di Fitalia	366612	4186827
CF-03_r	Campofelice di Fitalia	367414	4186249
CF-04_r	Campofelice di Fitalia	367808	4185895
CF-05_r	Campofelice di Fitalia	368221	4185627
CF-06_r	Campofelice di Fitalia	364855	4187855
CF-07_r	Campofelice di Fitalia	366221	4186975

### 3 GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO

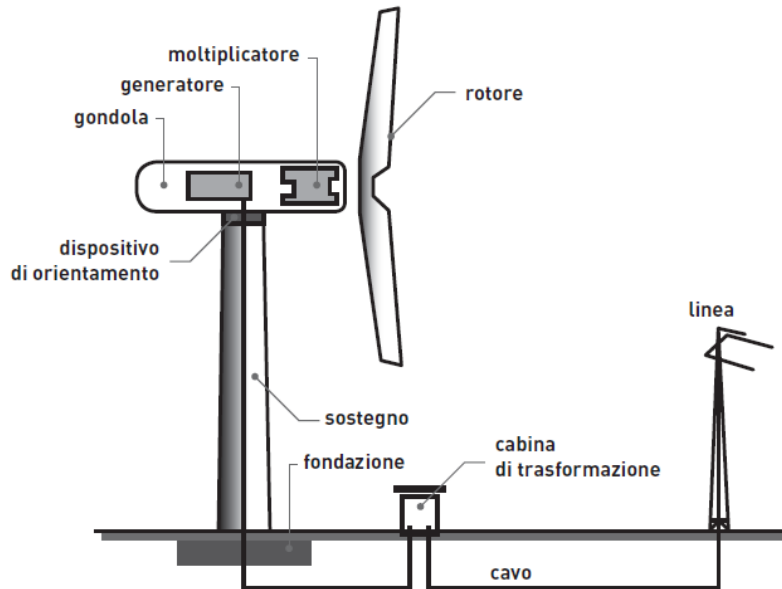
Un aerogeneratore (o turbina eolica) è, in generale, costituito dai seguenti sottosistemi principali:

- il rotore, che trasforma l'energia cinetica del vento in energia meccanica mediante tre 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'immissione nella rete elettrica.

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 primi 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, tuttavia il distacco della stessa si verifica in minima parte.

---

<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 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 nominale della turbina al momento del distaccamento;

- 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;
- La caduta della pala viene considerata sempre orizzontale per tutta la sua lunghezza;
- 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

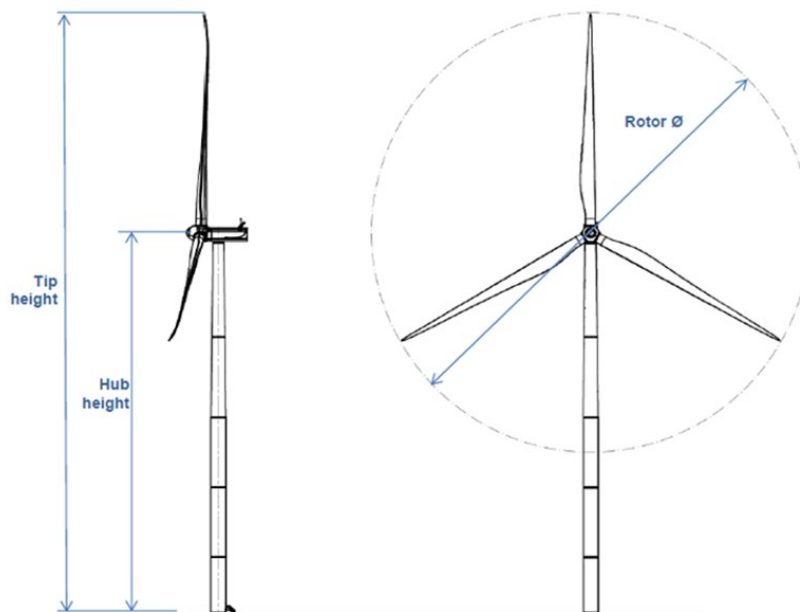
Gli aerogeneratori che verranno installati presso il nuovo impianto oggetto di questo studio saranno selezionati sulla base delle più innovative tecnologie disponibili sul mercato. La potenza nominale delle turbine previste sarà pari a massimo 6,0 MW. Il tipo e la taglia esatta dell'aerogeneratore saranno comunque individuati in seguito della fase di acquisto della macchina e verranno descritti in dettaglio in fase di progettazione esecutiva. Tuttavia, le dimensioni massime dell'aerogeneratore saranno 170 m di diametro del rotore e 125 m di altezza del mozzo.

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	Fino a 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>Fino a 125 m</b>
Classe di vento IEC	III A
Velocità cut-in	3 m/s
Velocità nominale	10 m/s
<b>Velocità cut-out</b>	<b>25 m/s</b>
<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:



**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:  $(83,5/3) + (85 - 83,5) = 29,33 \text{ m}$ .

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:

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

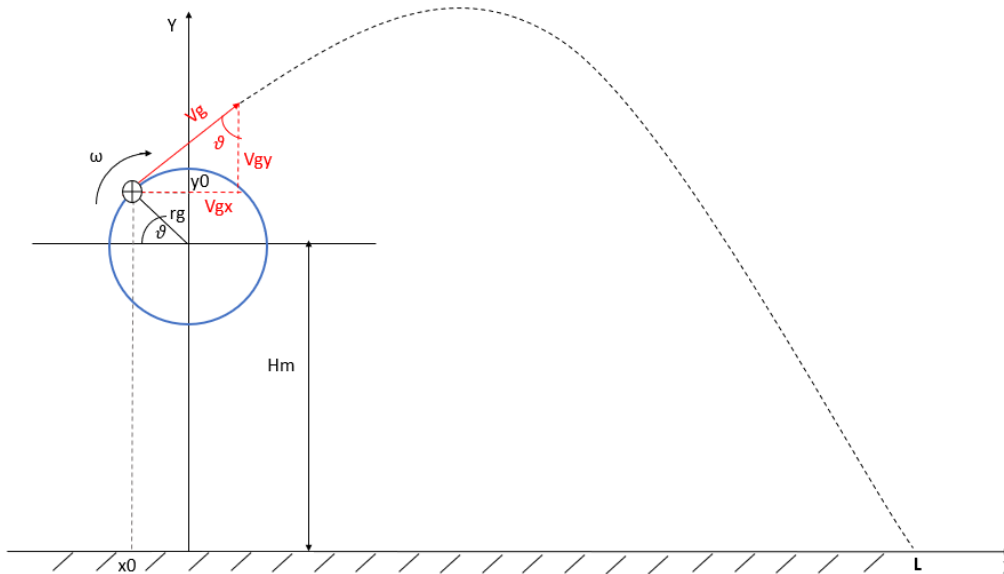
Dove:

- $x_o$  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  $9,81 \text{ m/s}^2$
- $t$  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:

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

Risolvendo 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:

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

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  $H_m$ : 125 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).

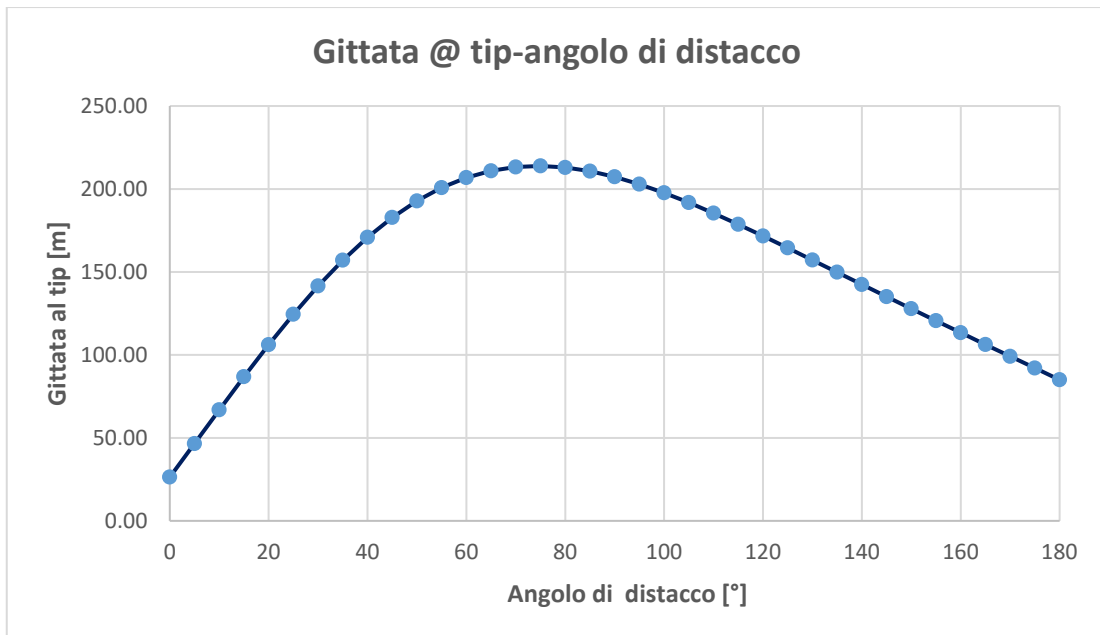
Sono riportati di seguito i valori ottenuti di gittata massima, al variare dell'angolo di distacco  $\vartheta$ :

Tabella 3: Risultati calcolo gittata massima

Angolo di distacco $\theta$ [°]	Posizione iniziale baricentro		Componenti $v_g$		Tempo di Volo T [s]	Gittata L [m]	Gittata @ tip $L_{tip}$ [m] $X_0$
	$X_0$	$Y_0$	$v_{gx}$ [m/s]	$v_{gy}$ [m/s]			
0	-29,33	125,00	0,00	27,03	8,51	-29,33	26,33
5	-29,22	127,56	2,36	26,93	8,54	-9,11	46,56
10	-28,89	130,09	4,69	26,62	8,53	11,18	66,84
15	-28,33	132,59	7,00	26,11	8,50	31,15	86,82
20	-27,56	135,03	9,25	25,40	8,44	50,47	106,14
25	-26,59	137,40	11,42	24,50	8,35	68,80	124,47
30	-25,40	139,67	13,52	23,41	8,23	85,86	141,52
35	-24,03	141,82	15,50	22,14	8,09	101,39	157,05
40	-22,47	143,86	17,38	20,71	7,92	115,20	170,87
45	-20,74	145,74	19,11	19,11	7,74	127,15	182,82
50	-18,86	147,47	20,71	17,38	7,53	137,14	192,81
55	-16,82	149,03	22,14	15,50	7,31	145,14	200,81
60	-14,67	150,40	23,41	13,52	7,08	151,17	206,84
65	-12,40	151,59	24,50	11,42	6,84	155,28	210,95
70	-10,03	152,56	25,40	9,25	6,60	157,58	213,25
<b>75</b>	<b>-7,59</b>	<b>153,33</b>	<b>26,11</b>	<b>7,00</b>	<b>6,35</b>	<b>158,20</b>	<b>213,87</b>
80	-5,09	153,89	26,62	4,69	6,10	157,30	212,96
85	-2,56	154,22	26,93	2,36	5,85	155,05	210,71
90	0,00	154,33	27,03	0,00	5,61	151,63	207,30
95	2,56	154,22	26,93	-2,36	5,37	147,23	202,89
100	5,09	153,89	26,62	-4,69	5,14	142,01	197,68
105	7,59	153,33	26,11	-7,00	4,92	136,14	191,81
110	10,03	152,56	25,40	-9,25	4,71	129,77	185,43
115	12,40	151,59	24,50	-11,42	4,52	123,02	178,68
120	14,67	150,40	23,41	-13,52	4,33	116,00	171,66
125	16,82	149,03	22,14	-15,50	4,15	108,80	164,47
130	18,86	147,47	20,71	-17,38	3,99	101,50	157,16
135	20,74	145,74	19,11	-19,11	3,84	94,15	149,81
140	22,47	143,86	17,38	-20,71	3,70	86,79	142,45
145	24,03	141,82	15,50	-22,14	3,57	79,45	135,12
150	25,40	139,67	13,52	-23,41	3,46	72,16	127,82
155	26,59	137,40	11,42	-24,50	3,35	64,91	120,58
160	27,56	135,03	9,25	-25,40	3,26	57,72	113,39
165	28,33	132,59	7,00	-26,11	3,18	50,58	106,24
170	28,89	130,09	4,69	-26,62	3,11	43,47	99,14
175	29,22	127,56	2,36	-26,93	3,05	36,40	92,07
180	29,33	125,00	0,00	-27,03	3,00	29,33	85,00

**Dall'analisi si può evidenziare che la massima gittata si ottiene per un angolo di distacco  $\theta$  pari a 75° ed è pari a 213,87 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 recettore sensibile "RC" più vicino (unità abitativa) e la distanza dalla strada provinciale o regionale più vicina.

**Tabella 4: Distanza tra aerogeneratori di progetto ed elementi sensibili**

WTG	Distanza da recettore sensibile più vicino	Distanza da strada provinciale/regionale più vicina
VF-01_r	>500 m	>500 m
VF-02_r	Circa 360 m da RC 265	>500 m
VF-03_r	>500 m	>500 m
VF-04_r	Circa 300 m da RC 030	>500 m
CF-01_r	Circa 420 m da RC 134	Circa 210 m da SP 82
CF-02_r	>500 m	>500 m
CF-03_r	>500 m	>500 m
CF-04_r	>500 m	>500 m
CF-05_r	>500 m	>500 m
CF-06_r	Circa 292 m da RC 109	Circa 170 m da SP 82
CF-07_r	Circa 315 m da RC 138	>500 m

**Come visibile dalla tabella, tutti gli aerogeneratori si trovano ad una distanza da recettori sensibili maggiore rispetto alla gittata massima calcolata (circa 214 m).**

**Due soli aerogeneratori (CF 01 r e CF 06 r) si trovano ad una distanza da strada inferiore alla gittata massima. Tuttavia, la stima della gittata massima proposta è basata su un calcolo conservativo che non tiene conto delle forze di attrito dell'aria, sottolineando così un carattere precauzionale dell'analisi presentata.**

Inoltre, al netto delle assunzioni conservative, la probabilità di accadimento è ulteriormente mitigata dal fatto che la pala dovrebbe distaccarsi esattamente in direzione della strada e che l'area di collisione coincida nel tempo e nello spazio con la traiettoria percorsa dal bersaglio: infatti, a differenza di un classico recettore sensibile, che è sempre collocato in un punto dello spazio, la probabilità che la pala distaccata collida con un'autovettura in transito è a sua volta funzione della densità di traffico, pertanto le probabilità sono da considerarsi ulteriormente ridotte.



In aggiunta la strada provinciale in esame SP82, come mostrato in Figura 6-1, è una strada caratterizzata da traffico estremamente ridotto ed utilizzata prevalentemente dagli agricoltori.



**Figura 6-1: Vista strada SP82**

Ad ogni modo le pale degli aerogeneratori di progetto sono realizzate in fibra di vetro rinforzato con materiali plastici quali fibre epossidiche. Questi materiali permettono di limitare fortemente la probabilità di distacco. Anche in caso di rottura le fibre che compongono la pala la mantengono unita, e i sistemi di sicurezza e controllo possono intervenire riducendo la velocità di rotazione tempestivamente.

Di conseguenza, 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.