

PROPONENTE

## Repower Renewable Spa

Via Lavaredo, 44  
30174 Mestre (VE)



PROGETTAZIONE



Sinergo Spa - via Ca' Bembo 152  
30030 - Maerne di Martellago - Venezia - Italy  
tel 041.3642511 - fax 041.640481  
sinergospa.com - info@sinergospa.com  
Numero di commessa interno progettazione:

20032



Tenproject Srl - via De Gasperi 61  
82018 S. Giorgio del Sannio (BN)  
t +39 0824 337144 - f +39 0824 49315  
tenproject.it / info@tenproject.it

Progettista :  
Ing. Nicola Forte



Ingegneria Progetti Srl - via della Libertà 97  
90143 - Palermo (PA)  
t +39 091 640 5229  
priolo@ingegneriaprogetti.com  
pupella@ingegneriaprogetti.com

Consulenti  
per TENPROJECT

N° COMMESSA

# 1443

**NUOVO PARCO EOLICO "BORGO CHITARRA"  
LIBERO CONSORZIO COMUNALE DI TRAPANI  
COMUNI DI MAZARA DEL VALLO MARSALA**

**PROGETTO DEFINITIVO PER AUTORIZZAZIONE**

ELABORATO

**RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA  
DI UNA PALA DI UN AEROGENERATORE**

CODICE ELABORATO

## G.C.SIA01

NOME FILE

1443-PD\_A\_CG-SIA01\_REL\_r00

REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE	GF	PM	NF
00	Marzo 2021	PRIMA EMISSIONE	GF	PM	NF
			REDDATTO	VERIFICA	APPROVAZIONE

	<p align="center"><b>RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</b></p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>GE.MAZ01.CG.SIA01 19/03/2021 23/03/2021 00 1 di 12</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------

## INDICE

1.	PREMESSA.....	2
2.	IPOTESI DI CALCOLO.....	3
3.	CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO .....	3
4.	CALCOLO GITTATA NEL CASO DI DISTACCO NEL PUNTO DI ATTACCO DEL MOZZO.....	7
4.1.	Calcolo del baricentro .....	7
4.2.	Calcolo della velocità periferica .....	7
4.3.	Calcolo di hg .....	8
4.4.	Calcolo della gittata.....	8
5.	APPLICAZIONE DELLO STUDIO AL PROGETTO IN ESAME .....	11
6.	CONCLUSIONI.....	12

 <b>TENPROJECT</b>	<b>RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.MAZ01.CG.SIA01 19/03/2021 23/03/2021 00 2 di 12
-----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------

## 1. PREMESSA

Il progetto descritto nella presente relazione riguarda la realizzazione di un impianto eolico costituito da otto aerogeneratori della potenza di 6,00 MW ciascuno, per una potenza complessiva di 48 MW, da installare nel comune di Mazara del Vallo (TP) in località “Borgo Chitarra” e con opere di connessione ricadenti anche nel comune di Marsala (TP).

Proponente dell’iniziativa è la società Repower Renewable SpA.

La presente relazione riporta la procedura di prima approssimazione seguita per il calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore del tipo VESTAS V-150 con altezza al mozzo 125 m e potenza 6000 kW. 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. Questo calcolo viene eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare a cose o persone.

Lo studio riporta il calcolo della gittata nell’ipotesi di rottura dell’intera pala considerando un angolo di lancio variabile.

	<b>RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.MAZ01.CG.SIA01 19/03/2021 23/03/2021 00 3 di 12
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------

## 2. IPOTESI DI CALCOLO

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo sono le più gravose possibili in modo da giungere a risultati sicuramente cautelativi. Il calcolo della gittata massima è stato effettuato considerando una riduzione massima della velocità periferica del 30%, senza ridurre la velocità angolare.

Per il calcolo della massima gittata si considerano 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);
- Si è considerata la riduzione della velocità periferica pari al 30% per tener conto degli effetti della resistenza dovuta al mezzo in cui si svolge il moto (aria) e per considerare le forze di resistenza che si generano al momento di rottura della pala;
- Il calcolo della gittata è stato determinato per diversi valori dell'angolo  $\theta$ ;
- La velocità massima del rotore sarà limitata elettronicamente.

I dati geometrici e cinematici sui quali è basato il calcolo sono i seguenti:

- Altezza della torre  $H = 200$  m
- Diametro del rotore  $D = 150$  m, quindi lunghezza della pala 75 m
- Velocità di rotazione  $V = 12,6$  giri/min.

## 3. CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO

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

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati (o urtano ad esempio) 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 (aria).

Nel caso di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$M \cdot g = M a_g$$

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

	<b>RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.MAZ01.CG.SIA01 19/03/2021 23/03/2021 00 4 di 12
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------

Supponendo di concentrare tutto il peso nel centro di massa 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 durante la traiettoria che percorre, si mette a girare indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione al problema ci viene allora dalla risoluzione della prima equazione. Questa ci evidenzia che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme, pertanto ne compirà il caratteristico moto parabolico.

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 modulo  $g$ ) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato un 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 un sistema di riferimento cartesiano  $xy$  in cui l'origine  $O$  degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

Si è considerato il moto bidimensionale di un proiettile, come il moto di un punto materiale, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

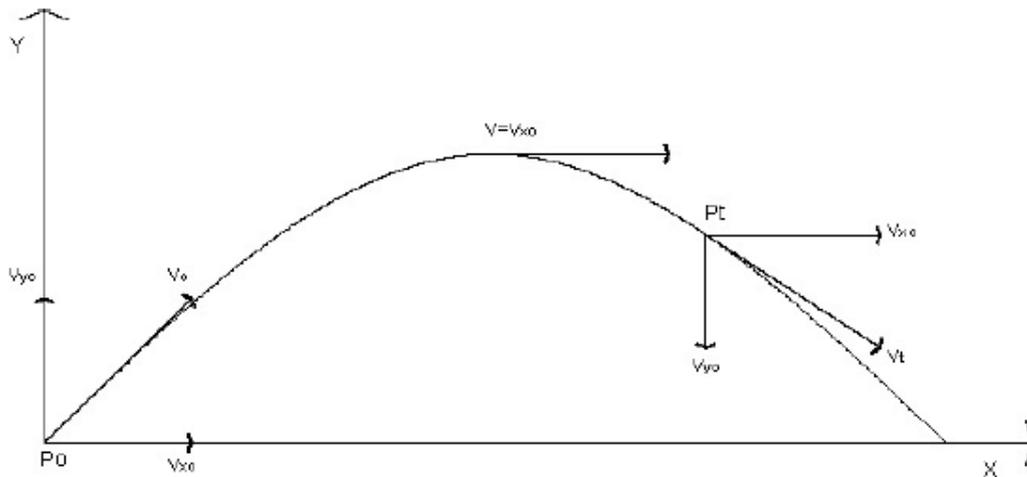
Si è scelto un sistema di riferimento con l'origine degli assi  $O$  centrata nel punto di partenza del corpo  $(x_0, y_0)$ , con l'asse delle  $Y$  positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle  $X$  nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno:

$$\ddot{x} = 0$$

$$\ddot{y} = -g$$

Dove  $g = 9,81m/s^2$  è l'accelerazione di gravità.

Rappresenteremo la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale  $v_0$  e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di  $\vartheta$  come in figura:


**Figura 1 - Traiettoria di un grave in caduta**

La legge del moto soluzione delle equazioni indicate in precedenza sono:

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

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

Dove  $(x_0, y_0)$  è la posizione iniziale del punto materiale e  $(v_x, v_y)$  è la sua velocità. La traiettoria del punto materiale intercutta il suolo al tempo  $T$  tale che  $y(T) = 0$ . Dalla legge del moto si ottiene:

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0 g}$$

Dove è stata scarta la soluzione corrispondente a tempi negativi

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

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

$$y_0 = H + R \sin(\vartheta)$$

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

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

La gittata  $G$  è la distanza dal palo del punto di impatto al suolo della pala. Dalla legge del moto otteniamo:

$$G = x(T)$$

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

	<b>RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.MAZ01.CG.SIA01 19/03/2021 23/03/2021 00 6 di 12
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------

$$G_{\max} = \frac{V_g \sin \vartheta}{g} \left[ V_g \cos \vartheta + \sqrt{V_g^2 \cos^2 \vartheta + 2(H + R_g \sin(\vartheta))g} \right] - R_g \cos \vartheta$$

Si noti che, fissato un generico angolo  $\vartheta$ , la gittata aumenta quadraticamente con  $V$ , salvo i casi particolari  $\vartheta = \pm 90^\circ; 0^\circ; 180^\circ$ , nei quali la gittata aumenta linearmente con  $V$  oppure è pari ad  $R$ .

	<b>RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.MAZ01.CG.SIA01 19/03/2021 23/03/2021 00 7 di 12
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------

#### 4. CALCOLO GITTATA NEL CASO DI DISTACCO NEL PUNTO DI ATTACCO DEL MOZZO

Lo schema adottato per il calcolo della gittata è il seguente, avendo indicato con G il baricentro del sistema avremo:

$R_g$  = raggio del baricentro

$V$  = velocità periferica del baricentro

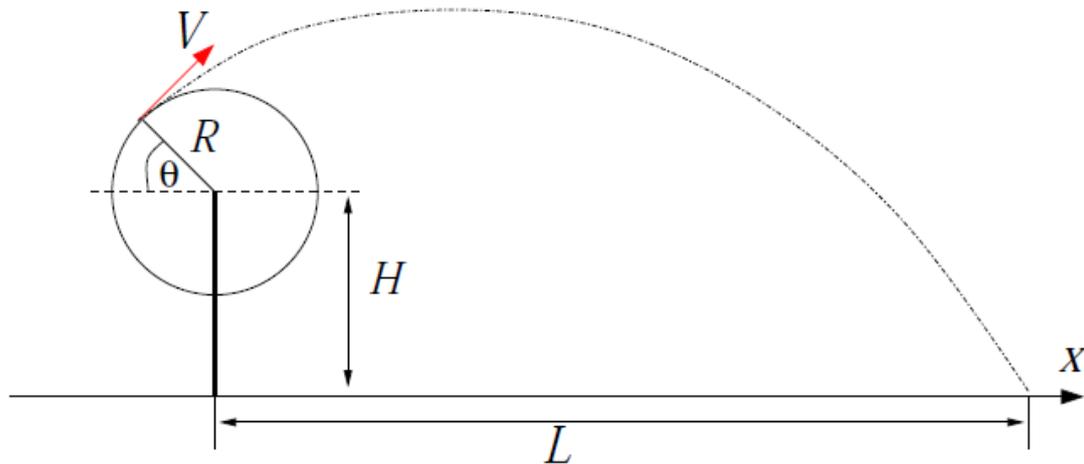


Figura 2 - Schema adottato per il calcolo della gittata

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

##### 4.1. Calcolo 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  $R_g = 1/3 (D/2) = 25$  m per l'aerogeneratore di progetto (essendo  $D = 150$  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 primo 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  $n = 12,6$  giri/min che corrisponde ad una velocità angolare:

	<b>RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.MAZ01.CG.SIA01 19/03/2021 23/03/2021 00 8 di 12
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 1,32 \text{ rad/s}$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio R percorre la circonferenza  $2\pi R$ ; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà  $2\pi n R$  metri/minuto. E questo sarà lo spazio percorso da tutti i punti situati sulla periferia del corpo in movimento circolare.

Dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante (considerando la velocità massima del rotore pari a 12,6 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot Rg = \frac{2\pi n}{60} \cdot Rg = 32,97 \frac{m}{s}$$

Tenendo conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulta ridotta del 30% rispetto all'assenza di resistenze, per cui il valore reale è **23,08 m/s**.

### 4.3. Calcolo di hg

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ossia  $Rg = 25 \text{ m}$ , essendo il raggio di ciascuna pala uguale a  $75 \text{ m}$ . Di conseguenza l'altezza di lancio (hg) sarà uguale all'altezza dell'intera torre più il valore della proiezione di Rg sulla verticale ossia:

$$hg = H_{\text{torre}} + (Rg \cdot \sin \vartheta)$$

Dove H è l'altezza della torre.

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato per i diversi valori dell'angolo  $\vartheta$ .

### 4.4. Calcolo della gittata

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo  $\vartheta$ . La tabella seguente mostra i valori della gittata massima:

Angolo	Radianti	sen	coseno	Gittata (m)
0,00	0,00	0,00	1,00	-25,00
5,00	0,09	0,09	1,00	-8,92
10,00	0,17	0,17	0,98	7,24
15,00	0,26	0,26	0,97	23,20
20,00	0,35	0,34	0,94	38,69
25,00	0,44	0,42	0,91	53,47
30,00	0,52	0,50	0,87	67,32
35,00	0,61	0,57	0,82	80,06
40,00	0,70	0,64	0,77	91,51
45,00	0,79	0,71	0,71	101,58
50,00	0,87	0,77	0,64	110,17
55,00	0,96	0,82	0,57	117,24
60,00	1,05	0,87	0,50	122,80
65,00	1,13	0,91	0,42	126,86
70,00	1,22	0,94	0,34	129,50
75,00	1,31	0,97	0,26	130,78
80,00	1,40	0,98	0,17	130,82
85,00	1,48	1,00	0,09	129,72
90,00	1,57	1,00	0,00	127,63
95,00	1,66	1,00	-0,09	124,65
100,00	1,75	0,98	-0,17	120,93
105,00	1,83	0,97	-0,26	116,57
110,00	1,92	0,94	-0,34	111,70
115,00	2,01	0,91	-0,42	106,40
120,00	2,09	0,87	-0,50	100,78
125,00	2,18	0,82	-0,57	94,90
130,00	2,27	0,77	-0,64	88,84
135,00	2,36	0,71	-0,71	82,64
140,00	2,44	0,64	-0,77	76,35
145,00	2,53	0,57	-0,82	69,99
150,00	2,62	0,50	-0,87	63,60
155,00	2,71	0,42	-0,91	57,19
160,00	2,79	0,34	-0,94	50,77
165,00	2,88	0,26	-0,97	44,35
170,00	2,97	0,17	-0,98	37,91
175,00	3,05	0,09	-1,00	31,47
180,00	3,14	0,00	-1,00	25,00

	<b>RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</b>	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	GE.MAZ01.CG.SIA01 19/03/2021 23/03/2021 00 10 di 12
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------

La gittata massima si ottiene per  $\vartheta=80^\circ$  ed il risultato numerico è pari a **130,82 m**; questo valore rappresenta il valore della gittata massima per il distacco in corrispondenza del mozzo.

Si ricorda che tale valore è stato determinato effettuando una riduzione del 30% della velocità periferica in modo da tener conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza che si generano al momento della rottura.

Noto il valore di gittata massima, date le caratteristiche geometriche della pala, precedentemente valutate, si può calcolare il punto in cui cade il vertice della pala stessa.

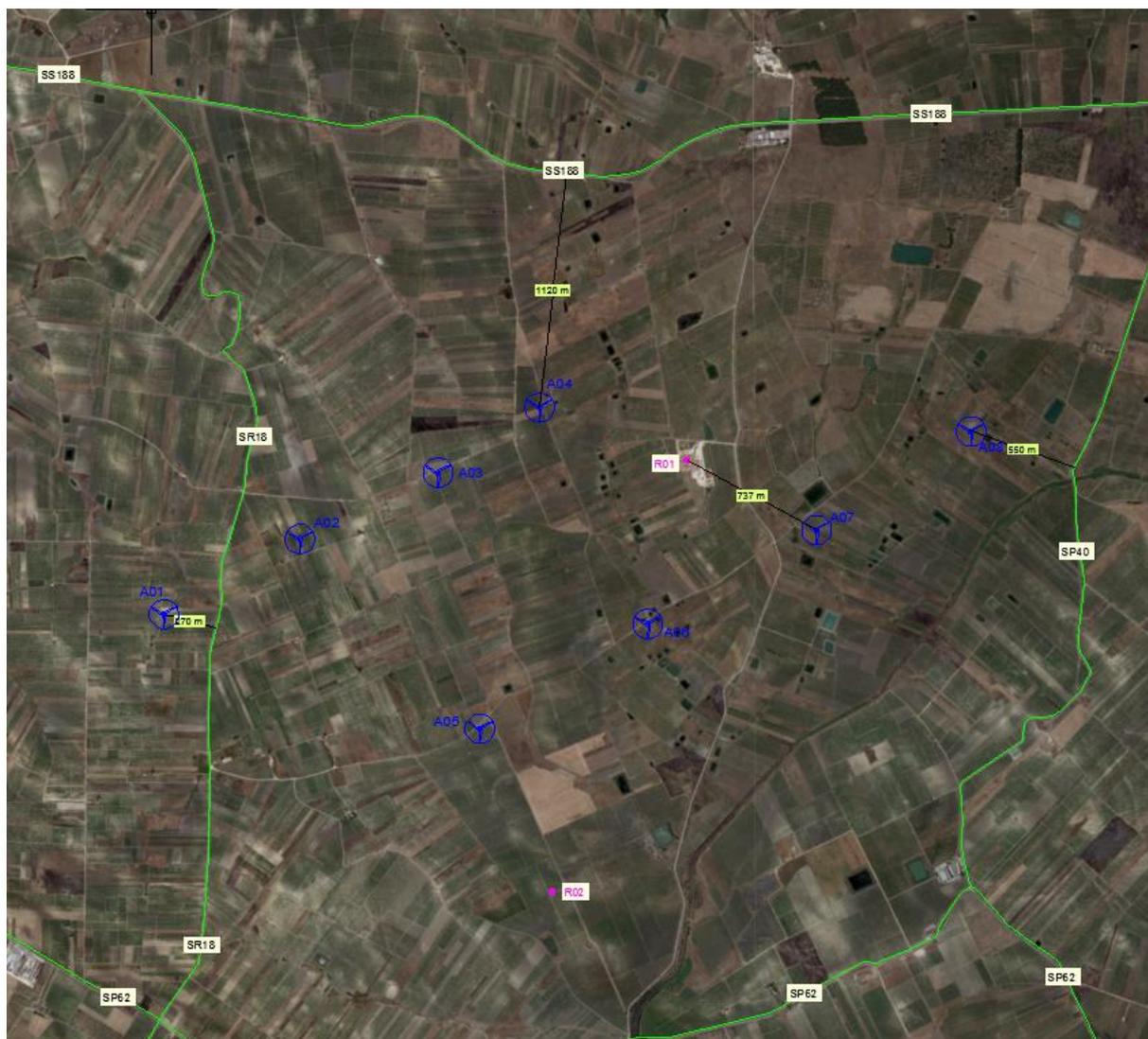
Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene il punto più lontano di caduta pari al valore massimo di gittata + i 2/3 della lunghezza della pala ovvero:

- Punto massima caduta:  $130,82 + 50 = \mathbf{180,82 m}$ .

## 5. APPLICAZIONE DELLO STUDIO AL PROGETTO IN ESAME

Nel caso dell'impianto eolico in esame si prevede la realizzazione di 8 aerogeneratori ad asse orizzontale V150 con altezza mozzo di 125 metri. Le immagini a seguire riportano la distanza minima dell'impianto dalle strade provinciali e dai recettori.

Dalle immagini si rileva che gli aerogeneratori si collocano ad una distanza minima di 550 m dalla strada provinciale più vicina (SP40), 270 m dalla SR18 (indicata su catastale come Trazzera Trapani Mazara del Vallo), 1200 m dalla strada statale più vicina (SS188) e ad una distanza di 737 m dal recettore più vicino.



**Figura 3:** Distanze minime degli aerogeneratori dalle strade principali e dai recettori

	<p align="center"><b>RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA</b></p>	<p>Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina</p>	<p>GE.MAZ01.CG.SIA01 19/03/2021 23/03/2021 00 12 di 12</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------

## 6. CONCLUSIONI

La progettazione dell'impianto eolico ha tenuto in debita considerazione il valore di gittata scaturito dal calcolo su presentato.

In base a quanto ottenuto per l'aerogeneratore di progetto il punto di caduta più lontano nel caso di rottura al mozzo corrisponde a **180,82 metri**. I valori di gittata sono stati ottenuti considerando una riduzione della velocità periferica del 30%, per tener conto delle forze resistenti e dell'attrito dell'aria.

*Le distanze minime degli aerogeneratori di progetto dalle strade principali (270 m), e dal recettore più vicino (738 m) sono maggiori dei valori di gittata nel caso di rottura al mozzo di una pala.*

Si conclude, quindi, che il progetto di impianto eolico, proposto dalla società Repower Renewable SpA nel territorio del Comune di Mazara del Vallo (TP) in località Borgo Chitarra, costituito da otto aerogeneratori del tipo V150 con altezza al mozzo 125 m di potenza nominale pari a 6 MW, non pone problemi alla pubblica sicurezza nell'ipotesi remota di rottura di una pala nel punto di serraggio al mozzo.