

# Regione Puglia

COMUNE DI SALICE SALENTINO(LE)-GUAGNANO(LE)-CAMPI SALENTINA(LE)  
SAN PANCRAZIO SALENTINO(BR)-CELLINO SAN MARCO(BR)  
MESAGNE(BR)-BRINDISI (BR)  
SAN DONACI (BR)

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI IMPIANTO PER LA  
PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTI RINNOVABILI,  
NONCHE' OPERE CONNESSE ED INFRASTRUTTURE, DI POTENZA  
PREVISTA IMMESSA IN RETE PARI A 105,40 MW  
ALIMENTATO DA FONTE EOLICA DENOMINATO "APPIA SAN MARCO"

## PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO "APPIA SAN MARCO"

Codice Impianto: G9ZFR24

Tav.:	Titolo:
R32	RELAZIONE CALCOLO GITTATA IN CASO DI ROTTURA PALA AEROGENERATORE

Scala:	Formato Stampa:	Codice Identificatore Elaborato
-:-	A4	G9ZFR24_RelazioneGittata_R32

Progettazione:	Committente:
 <p>Gruppo di progettazione: Ing. Santo Masilla - Responsabile Progetto Ing. Francesco Masilla</p>  <p>Amm. Francesco Di Maso Ing. Nicola Galdiero Ing. Pasquale Esposito</p> <p><small>Via Aosta n.30 - cap 10152 TORINO (TO) P.Iva 12400840018 - REA TO-1287260 Amm.re Soroush Tabatabaei</small></p> <p><small>Viale Michelangelo, 71 80123 Napoli Tel. 081 5197998 mail: tecnico@inse.it</small></p>	<p><b>ENERGIA LEVANTE s.r.l.</b> Via Luca Gaurico n.9/11 Regus Eur - 4° piano - Cap 00143 ROMA P.IVA 10240591007 - REA RM1219825 - energialevantesrl@legalmail.it www.sserenewables.com - Tel.: +39 0654831</p> <p>Società del Gruppo</p>  <p>For a better world of energy</p>
Indagini Specialistiche :	

Data	Motivo della revisione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:
Agosto 2022	Prima emissione	INSE S.R.L.	S.M.	G.M.



**PARCO EOLICO APPIA SAN MARCO**  
**RELAZIONE CALCOLO GITTATA IN CASO DI ROTTURA**  
**PALA AEROGENERATORE**

Agosto 2022

## Sommario

1	PREMESSA.....	2
1.1	DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO.....	2
2	IPTESI DI CALCOLO – MODELLO MATEMATICO .....	4
3	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA .....	8
3.1	PALA INTERA .....	8
3.2	FRAMMENTO DI 10 M .....	10
3.3	FRAMMENTO DI 5 M .....	11
4	ANALISI DEI RICETTORI .....	13
5	CONCLUSIONI .....	17



**PARCO EOLICO APPIA SAN MARCO**  
**RELAZIONE CALCOLO GITTATA IN CASO DI ROTTURA**  
**PALA AEROGENERATORE**

Agosto 2022

## **1 PREMESSA**

La società ENERGIA LEVANTE S.r.l. è proponente di un progetto di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica nei comuni di Salice Salentino e Guagnano in provincia di Lecce, in San Pancrazio Salentino, San Donaci e Cellino San Marco in provincia di Brindisi con opere di connessione e cavidotto nei Comuni di Salice Salentino (LE), Guagnano (LE), San Pancrazio Salentino (BR), San Donaci (BR), Cellino San Marco (BR) con opere di connessione alla RTN da ubicare nel comune di Cellino San Marco (BR).

L'ipotesi progettuale prevede l'installazione di n.17 aerogeneratori della potenza nominale di 6,2 MW per una potenza complessiva di impianto pari a 105,4 MW. Gli aerogeneratori saranno collegati tra loro attraverso cavidotto interrato in MT a 30kV che collegheranno il parco eolico alla stazione di trasformazione utente 30/150 kV. È previsto che la connessione alla Rete di Trasmissione Nazionale avvenga in corrispondenza della futura Stazione Elettrica 150/380 kV di proprietà di TERNA S.p.a., denominata Terna Cellino San Marco in agro di Cellino San Marco, la cui distanza dagli aerogeneratori varia da 10 Km a 6 km circa. L'area si presenta del tutto pianeggiante e degrada da quota 60 m a nord fino a 50m a sud su una distanza di 15km.

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'aerogeneratore e di un frammento di pala di 10 e 5 m.

### **1.1 DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO**

L'Area di Intervento ricade in parte nell'area d'ambito "Campagna Brindisina" e in parte nell'area d'ambito "Tavoliere Salentino"; entrambe le aree presentano le caratteristiche tipiche del "mosaico" del Tavoliere Salentino.

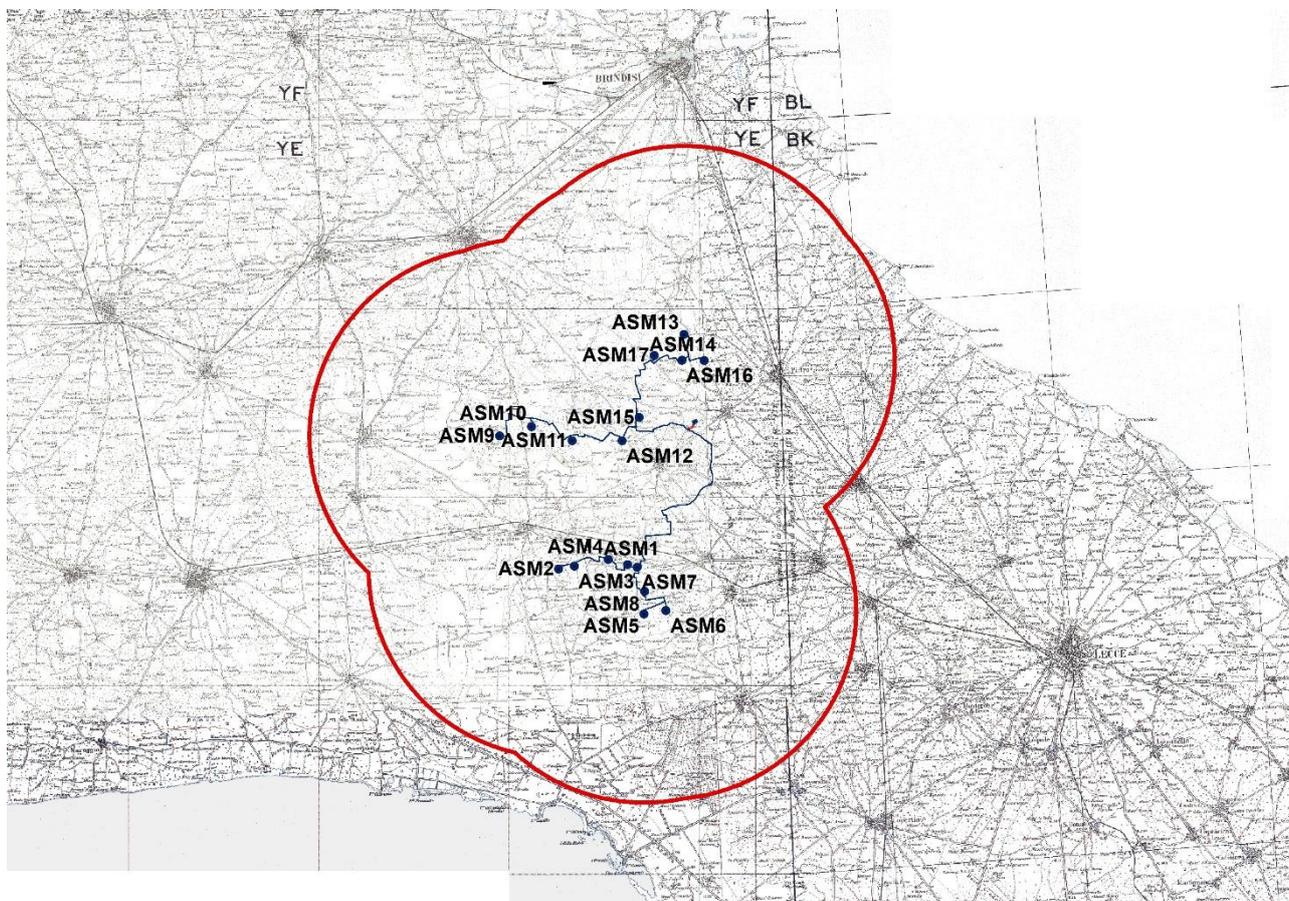


Figura 1: Inquadramento territoriale su cartografia IGM

Il layout in progetto prevede come precedentemente anticipato la realizzazione di n. 17 aerogeneratori della potenza unitaria di 6,2 MW, di produzione Siemens Gamesa SG170, ciascuno avente altezza al mozzo pari a 115 metri, rotore pari a 170 m e altezza totale pari a 200 metri, per una potenza complessiva di 105,4 MW.

N.WTG	Easting (X)	Northing (Y)	Altitude (m)	Comune	Provincia	Contrada	Foglio	P.IIa
ASM01	746175	4476257	48,4	Guagnano	Lecce	Scuorpo	29	352-253-99
ASM02	742552	4476021	58,7	Salice S.no	Lecce	Cascioni	3	431
ASM03	743368	4476168	55,4	Salice S.no	Lecce	Lo Pigno	3	86-90
ASM04	745150	4476521	51,1	Guagnano	Lecce	Bosco	28	21-36-35
ASM05	747030	4473634	50,6	Salice S.no	Lecce	Orsi	27	279
ASM06	748181	4473812	47,3	Salice S.no	Lecce	Il Pastore	28	122-226
ASM07	746682	4476123	47,8	Guagnano	Lecce	Scrascia	29	154
ASM08	747071	4474838	47,9	Salice S.no	Lecce	Misserandrea	17	260
ASM09	739448	4483072	63,5	San Pancrazio S.no	Brindisi	Lo Bello	8	9
ASM10	741131	4483560	55,8	San Donaci	Brindisi	Sierra	4	14-745-610
ASM11	743250	4482822	53,4	San Donaci	Brindisi	Verardi	4	810
ASM12	745879	4482825	44,8	San Donaci	Brindisi	Serio	16	17
ASM13	749134	4488464	58,4	Cellino San Marco	Brindisi	Chimienti	3	244-245
ASM14	750206	4487072	56,6	Cellino San Marco	Brindisi	Blasi	5	15

 <p>ENERSAT Via Aosta n.30 - cap 10132 TORINO (TO) P. IVA 23408000118 - REG. TEL. 0117/2700 Amn.rn Sorouah Talababai</p>	<b>PARCO EOLICO APPIA SAN MARCO</b>  <b>RELAZIONE CALCOLO GITTATA IN CASO DI ROTTURA</b> <b>PALA AEROGENERATORE</b>	Agosto 2022
---	--	-------------

ASM15	746782	4484061	59,2	Cellino San Marco	Brindisi	le Macchie	22	401
ASM16	749033	4487084	60,9	Cellino San Marco	Brindisi	Chimienti	4	157
ASM17	747577	4487349	63,6	Cellino San Marco	Brindisi	Chiurlia	3	227-114

## 2 IPOTESI DI CALCOLO – MODELLO MATEMATICO

Sarà preso in considerazione il calcolo della gittata modellizzando, con opportune semplificazioni, il moto della pala o di un frammento di pala (in seguito indicato genericamente come “corpo”) nell’aria considerando l’ attrito viscoso o se si preferisce l’ attrito dell’aria prodotto su di esso durante la caduta. Sottolineiamo fin d’ora che tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte sono a vantaggio della sicurezza, ovvero producono risultati con approssimazione in eccesso della gittata massima in caso di rottura di elementi rotanti, poiché il calcolo sarà fondato su un modello puramente balistico.

La determinazione dell’equazione del moto nel caso di un distacco di un corpo dal rotore in movimento è molto complessa. È evidente però che si tratta di un moto rotazionale complesso in quanto il corpo, quando inizierà il suo moto libero, continuerà anche a ruotare per l’ ineluttabile legge fisica di conservazione della quantità del moto. Quindi nel moto libero (dopo il distacco) una parte dell’energia cinetica posseduta dal corpo verrà dissipata nel moto rotazionale che finirà per generare turbolenze. Di queste dissipazioni non si terrà conto nel calcolo che pertanto sarà prudenziale.

Una volta che il corpo si sarà distaccato le forze inerziali agenti saranno la forza di gravità e le forze viscosse dovute alla resistenza prodotta dall’aria. La velocità di rotazione al momento del distacco, presa in considerazione per il calcolo, è quella massima indicata dal costruttore. È evidente che i sofisticati sistemi di controllo non permetterebbero al rotore dell’aerogeneratore di ruotare ad una velocità maggiore di quelle indicate nelle specifiche tecniche.

Per il calcolo della massima gittata si considerano le seguenti ipotesi:

- 1) Si fa riferimento al baricentro del corpo (sulla base della forma e dimensione opportunamente ipotizzate) e si applicano ad esso le equazioni del moto;
- 2) Il calcolo della gittata è stato determinato per diversi valori dell'angolo  $\Theta$ , che dipende dalle caratteristiche geometriche del sistema come altezza al mozzo, diametro rotore e dimensioni pale/frammenti, e la velocità di rotazione al momento del distacco;
- 3) Si assume come velocità iniziale  $V_0$  il vettore applicato nel baricentro di cui al punto precedente al distacco, avente come modulo la velocità tangenziale corrispondente alla massima velocità angolare di esercizio per un raggio pari alla distanza del baricentro dal centro

di rotazione e come direzione quella della tangente nello stesso baricentro al moto circolare da esso mantenuto fino al momento del distacco;

- 4) Si tiene conto della spinta del vento in direzione ortogonale al piano del rotore (convenzionalmente individuato dal piano XZ) che influenzerà la traiettoria ed il moto del corpo distaccato. Tale velocità verrà considerata come la massima di funzionamento dell'aerogeneratore prima che le pale vengano automaticamente poste in stallo (velocità di cut-off);
- 5) Si ipotizza una temperatura ambientale di 40°C, alla quale corrisponde il valore di densità dell'aria 0,898 kg/m<sup>3</sup>, che minimizza l'effetto dell'attrito della stessa sul corpo in volo;
- 6) Il modulo della forza di attrito agente sul corpo in moto libero a seguito del distacco è dato dalla seguente formula:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} C_d A V_{xz}^2$$

Dove:

- $\rho_{aria}$  è la densità dell'aria che cambia in relazione alla quota altimetrica del sito di installazione degli aerogeneratori ma anche in base alle dimensioni e quindi massime altezze raggiunte dal sistema torre tubolare + rotore. In questo caso è posta pari a 0,898 Kg/m<sup>3</sup>.
- $C_d$  è il coefficiente di attrito ampiamente dipendente delle caratteristiche geometriche della pala. Sulla base di dati riportati in letteratura tale valore è stato assunto pari a 1.
- $A$  è la superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria. Nel caso di un frammento di pala di 10 m, si è considerata una superficie efficace di 5 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- $V_{xz}$  è il modulo della proiezione del vettore velocità del corpo sul piano XZ misurata con riferimento al baricentro del corpo

- 7) Il moto libero di un corpo di massa M sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto dalle seguenti equazioni:

$$a_x = -\frac{1}{M} F_D \cos(\alpha)$$

$$a_y = \frac{1}{2} \rho_{aria} C_d A (w - V_y^2) / M$$

$$a_z = -\frac{1}{M} (F_D \sin(\alpha) + M g)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} C_d A V_{xz}^2$$

Dove:

- $\alpha$  rappresenta l'arcotangente del rapporto  $V_z / V_x$  e cambia da istante a istante durante il moto libero di caduta;
- $w$  è il modulo della velocità del vento, supposta ortogonale al piano XZ e costante per tutta la durata del moto;
- $V_y$  è il modulo della componente della velocità del corpo avente la stessa direzione del vento;
- $g$  è l'accelerazione di gravità.

Le condizioni al contorno indipendenti sono:

- temperatura ambiente e velocità del vento, impostate nei valori estremi di esercizio come precedentemente esposto;
- altezza del mozzo posta pari a 115 m.
- massa  $M$ , area efficace  $A$ , lunghezza  $L$  posizione del baricentro del corpo distaccato (posta a 1/3 della lunghezza nel caso dell'intera pala e a 1/2 nel caso di un frammento);
- $\alpha_0$  viene inizializzato al valore arbitrario di  $20^\circ$ , prossimo a valori descritti in letteratura per analoghi esperimenti;
- si pongono ascissa e ordinata del baricentro del corpo al momento del distacco  $X_0=0$  e  $Y_0=0$
- si pone la componente iniziale del vettore velocità in direzione del vento  $V_{y0}=0$ , in quanto tale vettore, nel momento del distacco, è determinato dal solo movimento del rotore che è supposto ortogonale al vento stesso;

Da queste dipendono le seguenti condizioni:

- quota di distacco  $Z_0$ ;

- densità dell'aria iniziale;
- componenti iniziali  $V_{x0}$  e  $V_{z0}$  del vettore velocità e le componenti del vettore accelerazione.

La soluzione del sistema di equazioni viene determinata con il metodo di Eulero che è un metodo iterativo per la risoluzione di equazioni differenziali partendo dalle condizioni al contorno. Tale soluzione ci permetterà di definire il moto del corpo distaccato nello spazio tridimensionale rappresentato in un sistema cartesiano ortogonale XYZ, in cui:

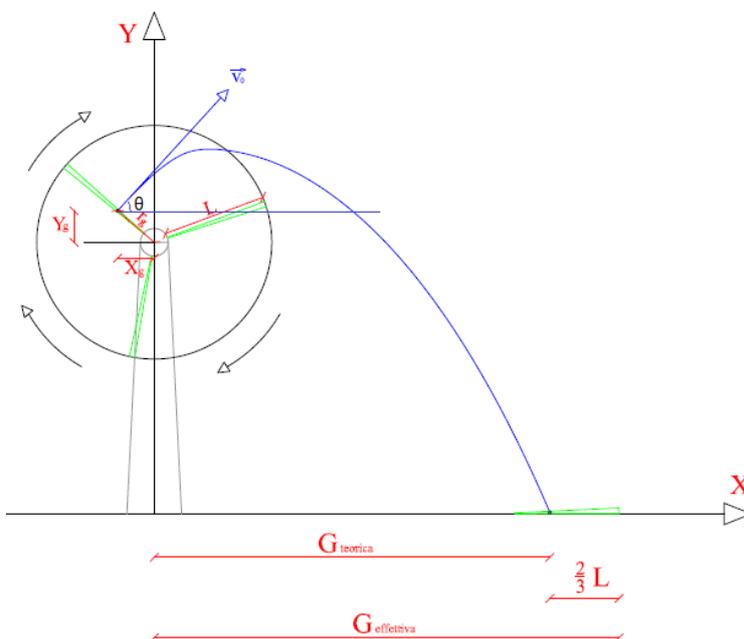
- il piano XY rappresenta il piano orizzontale, corrispondente al livello del mare;
- il piano XZ viene fatto coincidere con il piano su cui giace il rotore (ortogonale alla direzione del vento);
- il piano YZ viene fissato, ortogonalmente agli altri due piani coordinati, facendo coincidere l'origine del sistema con la proiezione sul piano XY del baricentro del corpo nell'istante del distacco.

Con questa rappresentazione geometrica è evidente che al momento della definizione della gittata massima si dovrà tenere in conto della lunghezza del corpo in caduta, ma anche della geometria del modello. Ora, poiché la gittata è calcolata a partire dal mozzo, dovrà essere calcolata la distanza tra mozzo e punto di caduta del baricentro del corpo distaccato.

Nel punto di caduta si terrà conto della lunghezza del frammento o della pala, per cui la formula della gittata massima sarà pari alla somma della distanza tra il centro torre e il punto previsto di caduta con i 2/3 della lunghezza della pala (nel caso del distacco della pala intera) o 1/3 della medesima lunghezza (per distacco di un frammento).

Una volta impostato e risolto il modello con riferimento al valore iniziale di  $\alpha$  pari a  $20^\circ$ , si è proceduto per tentativi alla determinazione dell'angolo  $\alpha$  che massimizzi la gittata.

Si fa presente che nel caso in questione, trattandosi di un'area pressoché pianeggiante, la quota di atterraggio della pala o del frammento sarà la stessa della base della torre. Qualora la morfologia del sito fosse caratterizzata da pendenze più significative la quota di arrivo del corpo sarebbe differente, andando a influenzare di conseguenza la gittata stessa.



### 3 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

#### 3.1 PALA INTERA

Come anticipato in precedenza il moto del corpo libero di una determinata massa  $M$  sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto dalle equazioni precedentemente attenzionate (punto 7) capitolo 2), risolte mediante il metodo iterativo di Eulero, rispetto le variabili  $x, y, z$ . Nell'istante in cui  $z$  assume il valore pari al livello previsto per l'impatto, il punto di caduta del baricentro della pala è calcolato (teorema di Pitagora) dai corrispondenti valori di  $x$  e  $y$  al medesimo istante. La massima gittata verrà ricavata come in precedentemente detto dalla seguente formula:

$$G_{MAX} = X_{CADUTA} - X_{WTG} + \frac{2}{3}L_P$$

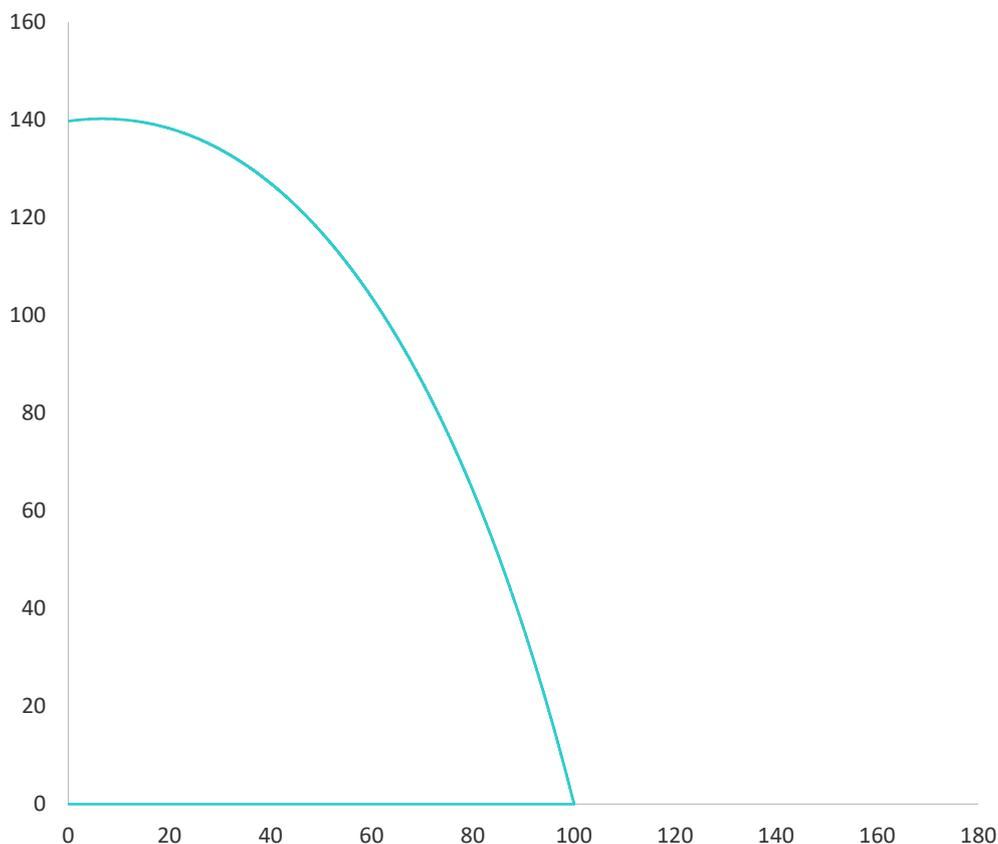
Nel caso di distacco della pala intera sono stati presi in considerazione i seguenti parametri:

- Massa  $M$  dell'intera pala assunta pari a 25 tonnellate;
- Altezza al mozzo pari a 115 m;
- Diametro del rotore pari a 170 m;
- Lunghezza della pala  $L_P$  pari ad 83,3 m;
- Velocità di cut off pari a 25 m/s;
- Velocità di rotazione del rotore pari a 8,5 giri/minuto;

- Cd (coefficiente di contrazione) pari ad 1 sulla base dei dati riportati in letteratura;
- Superficie efficace A della pala che si oppone alla resistenza dell'aria pari a circa 250 m<sup>2</sup>. Tale valore è stato ottenuto come prodotto tra la lunghezza della pala e la sua altezza media, ottenuta come media tra la corda massima e minima rinvenibili dalle specifiche tecniche (pari mediamente circa a 3 m);
- Per tentativi è stato calcolato l'angolo che massimizza la gitta pari a 8°;
- In considerazione del fatto che l'area di progetto è praticamente pianeggiante si è ipotizzato che la quota di caduta della pala è la stessa quota della base torre. Infatti, le quote sul livello del mare degli aerogeneratori variano tra un massimo di 64 m ad un minimo di 47 m.
- Densità dell'aria  $\rho_{ARIA}=0,898 \text{ kg/m}^3$ .

Il valore della gittata massima ricavato è pari a  $G_{MAX}= 160 \text{ m}$  con un tempo di permanenza in volo di **7,1 secondi**. Di seguito viene riportata la traiettoria del moto della pala.

Traiettoria con gittata massima



### 3.2 FRAMMENTO DI 10 M

Analogamente al caso di distacco della pala intera, nel caso in cui il corpo distaccatosi è un frammento della stessa la formula per calcolare la gittata è la seguente:

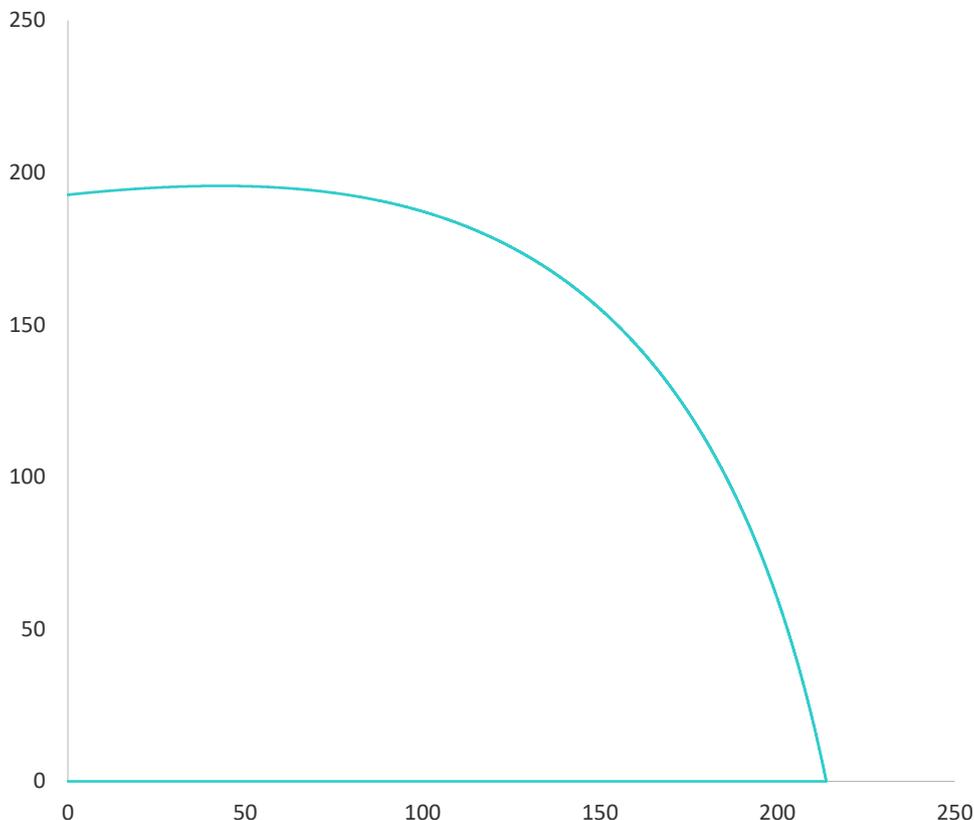
$$G_{MAX} = X_{CADUTA} - X_{WTG} + \frac{1}{2}L_F$$

Anche in questo caso i parametri presi in considerazione sono gli stessi dei precedenti a meno di:

- Lunghezza del frammento  $L_F = 10$  m
- Massa  $M$  del frammento assunto pari a 926 kg;
- Superficie efficace  $A$  del frammento di 10 m assunto pari a  $15 \text{ m}^2$  tenendo conto della geometria dello stesso;
- Angolo che massimizza la gitta pari a  $7^\circ$ ;

il valore della gittata ricavata dal calcolo è pari a circa **230 m** con un tempo di permanenza in volo di **9,9 secondi**. Si allega di seguito il grafico della traiettoria del frammento:

Traiettoria con gittata massima - frammento  
 $L=10m$



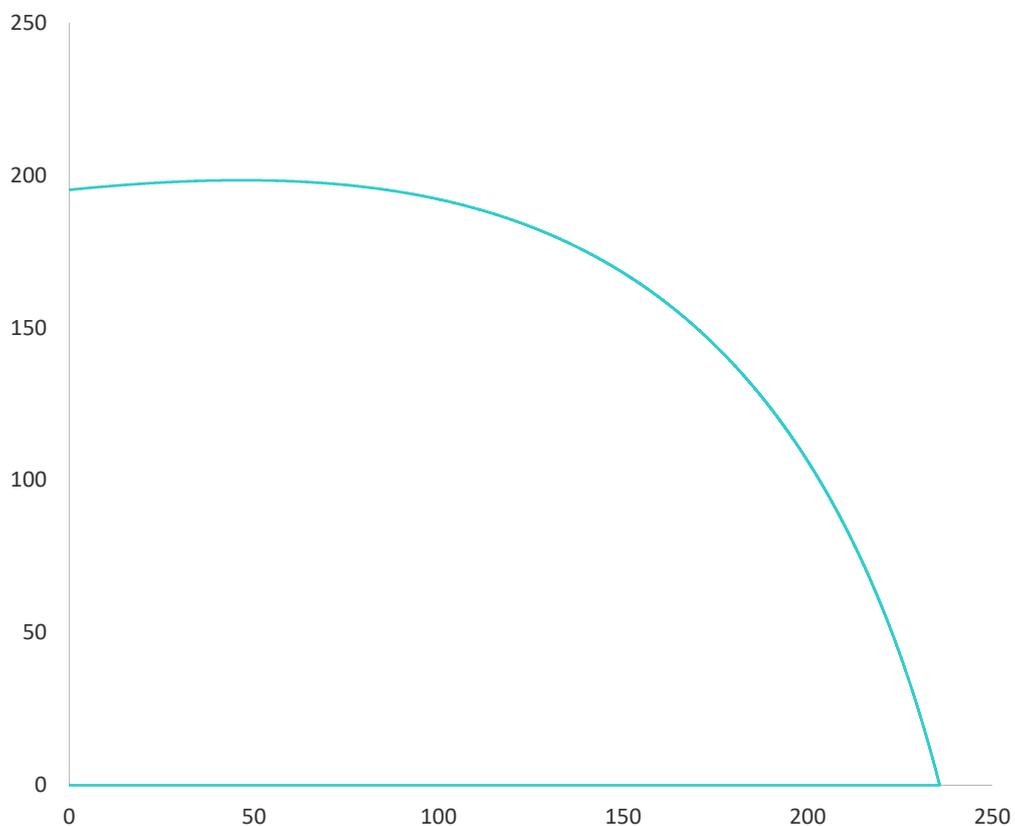
### 3.3 FRAMMENTO DI 5 M

A seguire verranno riportati i valori della gittata per un frammento di 5 m, che sarà ricavata dalla stessa formula utilizzata nel caso del frammento di 10 m, per la quale in questo caso sono stati impostati i seguenti valori, oltre quelli segnati nel paragrafo 3.1:

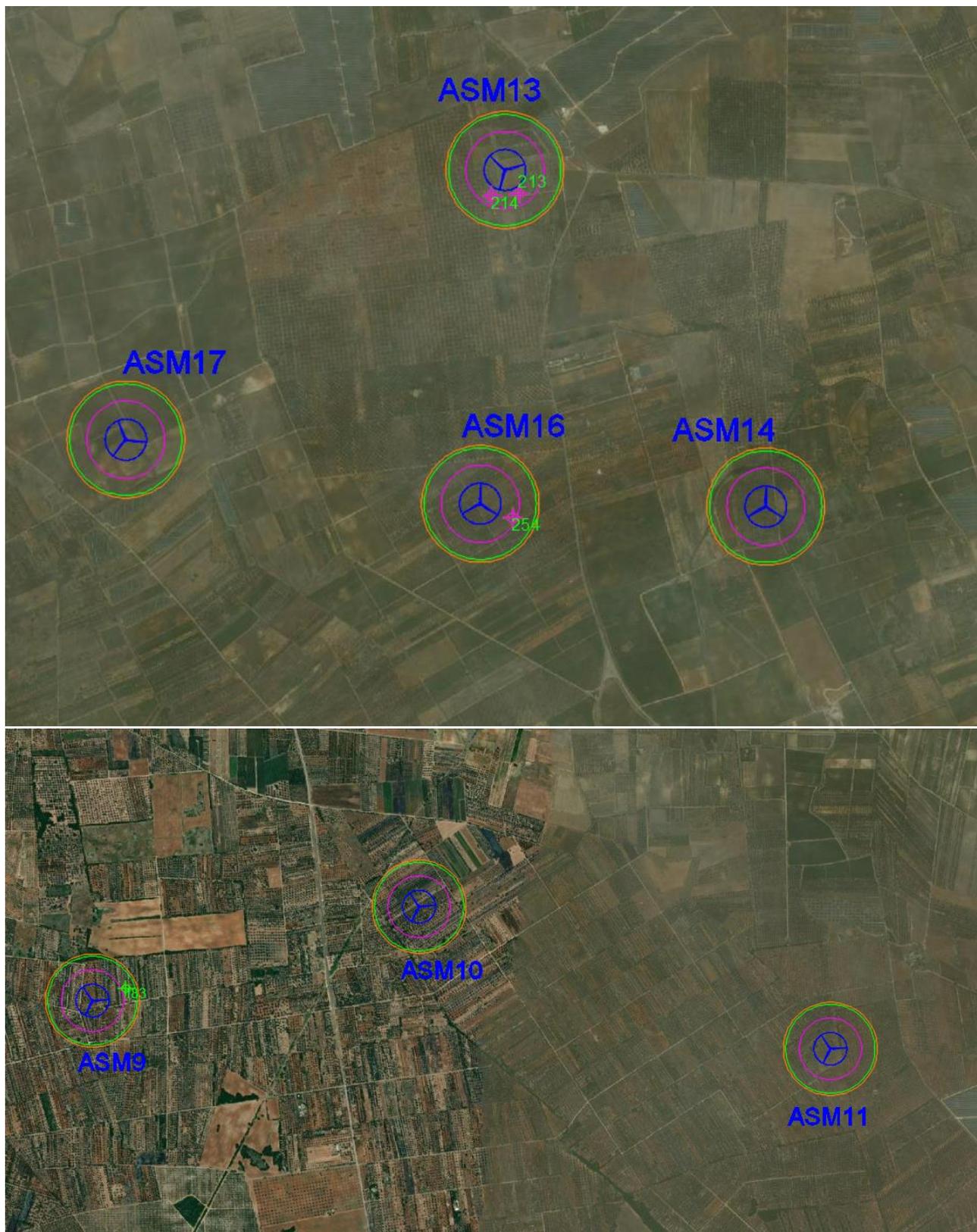
- Lunghezza del frammento  $L_F = 5$  m
- Massa  $M$  del frammento assunto pari a 463 kg, ossia la metà del peso del frammento di 10 m;
- Superficie efficace  $A$  assunto pari alla metà del frammento da 10 m, ossia  $6,5$  m<sup>2</sup>;
- Angolo che massimizza la gitta pari a  $7^\circ$ ;

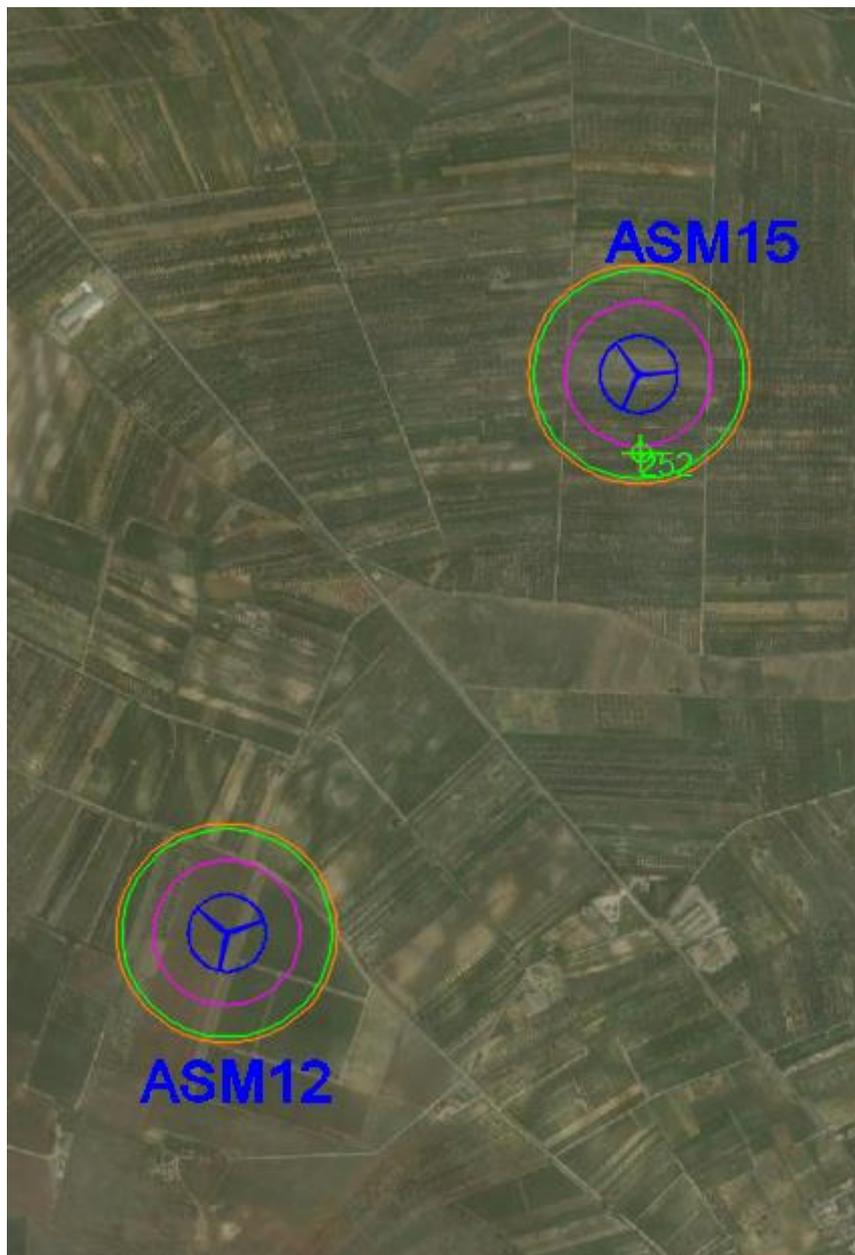
Il valore della gittata ricavata dal calcolo è pari a circa **242 m** con un tempo di permanenza in volo di **10 secondi**. Si allega di seguito il grafico della traiettoria del frammento:

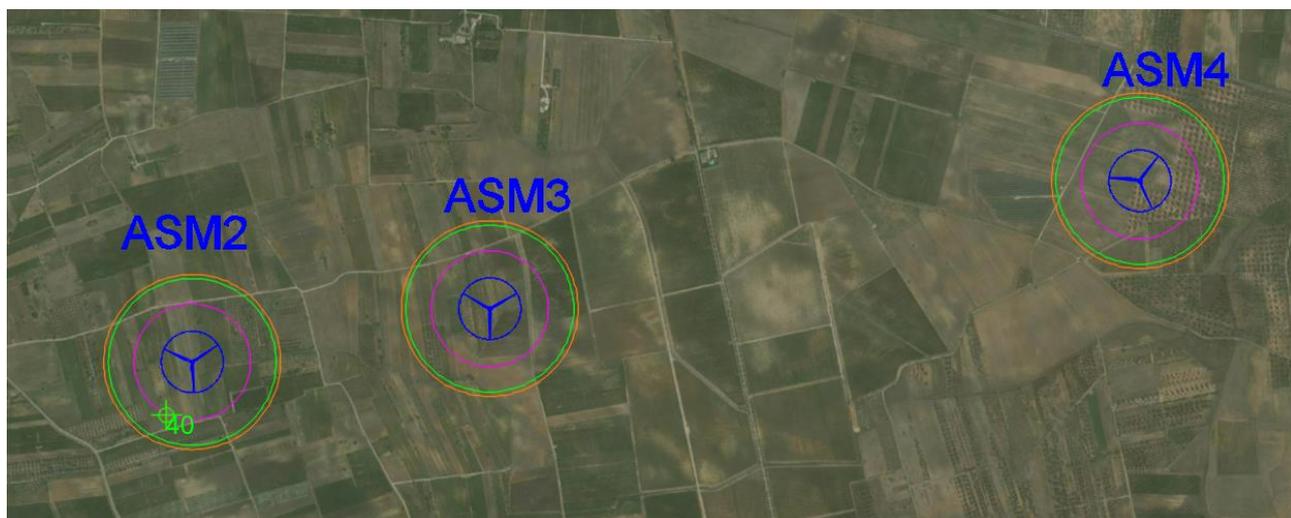
Traiettoria con gittata massima - Frammento L=5 m



#### 4 ANALISI DEI RICETTORI







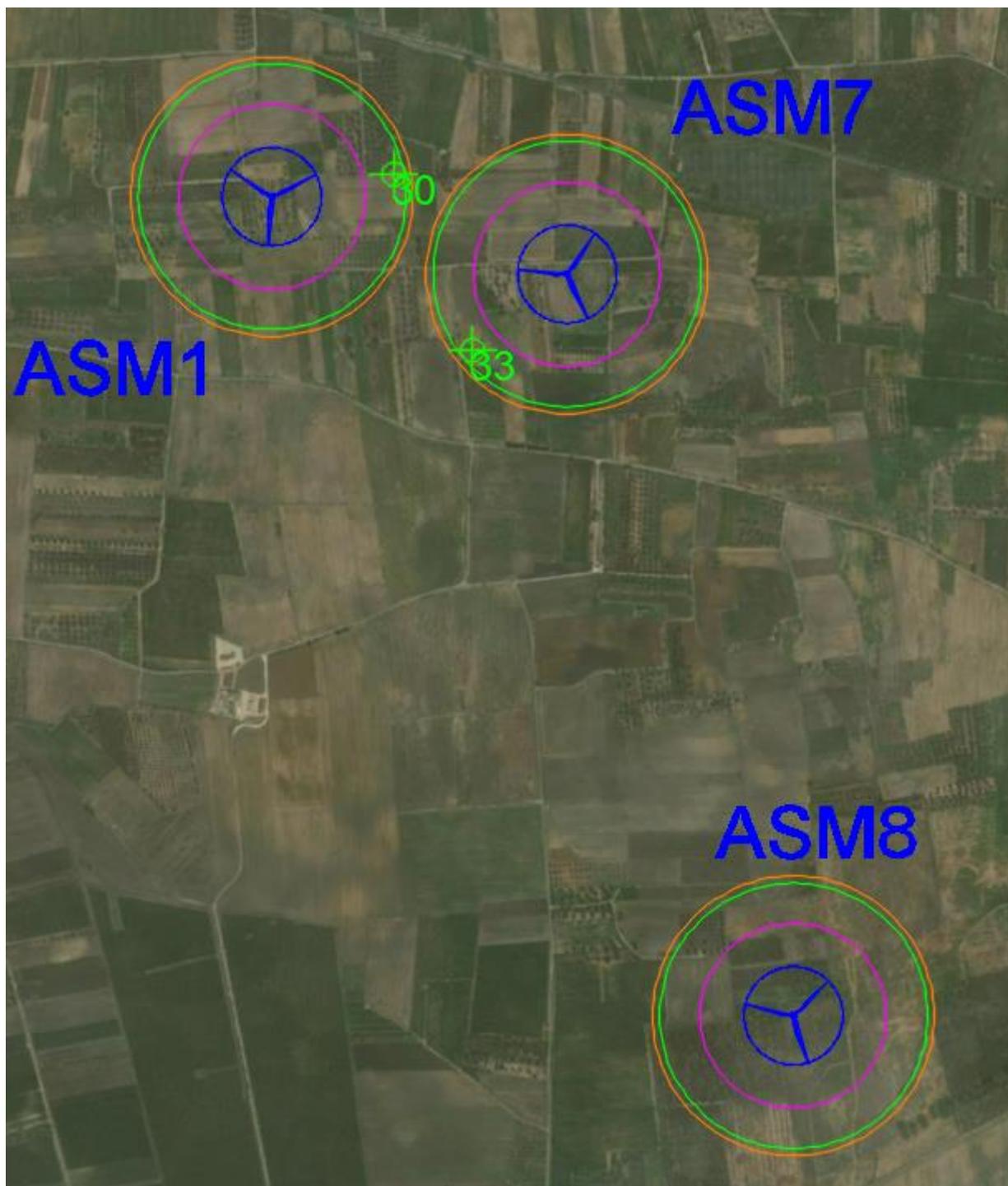




Figura 2: Individuazione planimetrica dei ricettori nel buffer di 160 metri per la pala intera (MAGENTA), 230 m per il frammento di 10 metri (VERDE) e 242 metri per il frammento da 5 metri (ARANCIONE)

L'individuazione e la scelta dei fabbricati da considerare come ricettori sensibili nella verifica dell'impatto in caso di rottura accidentale della pala, è stata effettuata individuando in un raggio 242 metri i fabbricati esistenti e se del caso, verificare la destinazione d'uso degli stessi.

Si rappresenta che nell'area intorno agli aerogeneratori per un raggio di 242 metri ricadono i ricettori:

30, 33, 40, 97, 98, 123, 183, 213, 214, 252 e 254.

Di questi risulta accatastato solamente il numero 30 come C/2 e non abitabile "Magazzini e locali di deposito", quindi si può intendere come ricettore non sensibile; tale ricettore non ricade nell'area buffer della gittata per l'intera pala, ma solamente per i frammenti di 10 e 5 m. I restanti ricettori che rientrano nell'area buffer risultano essere non abitabili e non presenti né al catasto terreni né immobiliare.

## 5 CONCLUSIONI

La definizione del moto di una pala di un aerogeneratore o di un frammento di pala è un problema alquanto complesso. È certo sulla base dell'esperienza e di semplici considerazioni fisiche (conservazione della quantità di moto) che trattasi di un moto rotazionale complesso in un fluido viscoso (aria).

Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro valori ampiamente conservativi e mettendosi nelle condizioni di esercizio più gravose (massima velocità di rotazione, massima velocità del vento), il valore

 <small>Via Aosta n.30 - cap 10132 TORINO (TO) P.IVA 23400800121 - REG. TIC. 1387200 Amn.rn Sorouah Talababai</small>	<b>PARCO EOLICO APPIA SAN MARCO</b> <b>RELAZIONE CALCOLO GITTATA IN CASO DI ROTTURA</b> <b>PALA AEROGENERATORE</b>	Agosto 2022
---	--	-------------

della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi quale Gittata Massima.

Il calcolo è stato poi eseguito risolvendo le stesse equazioni nel caso in cui il distacco fosse riferito a frammenti di pala, benché tale evento sia da considerarsi pressoché impossibile.

Dai calcoli è risultato che la massima gittata degli elementi rotanti che possono essere proiettati dagli aerogeneratori in progetto è di 160 metri nel caso di pala intera e rispettivamente di 230 m e 242 m per frammenti di 10 e 5 m.

Si riporta di seguito una tabella riepilogativa riportante i risultati conseguiti dal suddetto studio:

Lunghezza frammento/ Pala intera (m)	5	10	83,3
Peso frammento (kg)	463	926	25000
Coefficiente di forma	1	1	1
Superficie efficace di resistenza al moto (mq)*	6,5	15	250
Angolo di gittata max ottenuto per tentativi (gradi)	7	7	8
Tempo di volo (sec)	9,98	9,86	7,09
<b>Gittata massima (m)</b>	<b>241,37</b>	<b>226,70</b>	<b>159,89</b>
* tra parentesi è riportata l'altezza media della pala presa in considerazione per il calcolo dell'area			

Anche nel caso peggiore, la gittata si mantiene al di sotto dei 250 m e intorno agli aerogeneratori non esistono edifici sensibili.

I ricettori interessati dall'areale di 242 m, sono i ricettori 30, 33, 40, 97, 98, 123, 183, 213, 214, 252 e 254.

I sopracitati ricettori sono tutti non sensibili, non accatastati e non abitabili, come da studio dei ricettori allegato al progetto. L'unico ricettore che tra questi risulta accatastato è il 30, che ricade all'interno dell'area buffer individuata dalla WTG ASM1, ma anch'esso non risulta essere sensibile.