

# Parco Eolico "Pizzu Boi"

## Comune di Selegas e Guamaggiore (SU)

Proponente



**Sorgenia Renewables Srl**  
via Alessandro Algardi 4, Milano  
P.IVA/CF: 10300050969  
PEC: [sorgenia.renewables@legalmail.it](mailto:sorgenia.renewables@legalmail.it)



### ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

Progettista



**Tiemes Srl**  
Via R. Galli 9 – 20148 Milano  
tel. 024983104/ fax. 0249631510  
[www.tiemes.it](http://www.tiemes.it)

1	03/03/2023	Revisione 1	LB	VDA		
0	31/07/22	Prima emissione	AH	VDA		
Rev.	Data emiss	Descrizione	Preparato	Approvato		
Origine File: 21056 SLG.PD.R.10-01 – Analisi rottura organi rotanti.docx		<b>CODICE ELABORATO</b>				
		Commessa	Proc.	Tipo doc	Num	Rev
		21056   SLG	PD	R	10	01
Proprietà e diritti del presente documento sono riservati – la riproduzione è vietata / Ownership and copyright are reserved – reproduction is strictly forbidden						

## INDICE

<b>1</b>	<b>Premessa .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Scopo .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Proponente .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Struttura e ipotesi dell'analisi .....</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Forze agenti sulla traiettoria della pala .....</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Modello di calcolo .....</b>	<b>7</b>
<b>7</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>9</b>
7.1	Analisi dei ricettori .....	10

## INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 5-1 – SISTEMA DI COORDINATE USATO PER LA PALA (YY – FLAPWISE, XX – PITCHWISE, ZZ EDGEWISE).....	6
FIGURA 6-1 – RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLA GITTATA IN CASO DI $Dx < G$ (CASO 1).....	8
FIGURA 6-2 – RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLA GITTATA IN CASO DI $Dx > G$ (CASO 2) .....	8
FIGURA 7-1 – GITTATA DELL'INTERA PALA (254,5 M) IN COLORE GIALLO, DA AEROGENERATORE S2.....	10
FIGURA 7-2 – GITTATA DELL'INTERA PALA (254,5 M) IN COLORE GIALLO, DA AEROGENERATORE S3.....	11
FIGURA 7-3 – GITTATA DELL'INTERA PALA (254,5 M) IN COLORE GIALLO, DA AEROGENERATORE S4.....	12
FIGURA 7-4 – GITTATA DELL'INTERA PALA (254,5 M) IN COLORE GIALLO, DA AEROGENERATORE GU1 .....	13
FIGURA 7-5 – GITTATA DELL'INTERA PALA (254,5 M) IN COLORE GIALLO, DA AEROGENERATORE GU10 .....	14
FIGURA 7-6 – GITTATA DELL'INTERA PALA (254,5 M) IN COLORE GIALLO, DA AEROGENERATORE GU11 .....	15
FIGURA 7-7 – GITTATA DELL'INTERA PALA (254,5 M) IN COLORE GIALLO, DA AEROGENERATORE GU12 .....	16
FIGURA 7-8 – GITTATA DELL'INTERA PALA (254,5 M) IN COLORE GIALLO, DA AEROGENERATORE GU13 .....	17
FIGURA 7-9 – GITTATA DELL'INTERA PALA (254,5 M) IN COLORE GIALLO, DA AEROGENERATORE GU14 .....	18

## 1 Premessa

La società Sorgenia Renewables Srl, d'ora in avanti il proponente, intende realizzare un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nella provincia del Sud Sardegna, in agro dei comuni di Selegas e Guamaggiore.

L'impianto, denominato parco eolico "Pizzu Boi", sarà costituito da 9 aerogeneratori di potenza unitaria nominale fino a 6 MW, per una potenza installata complessiva fino a 54 MW.

Data la potenza dell'impianto, superiore ai 10.000 kW, il servizio di connessione sarà erogato in alta tensione (AT), ai sensi della Deliberazione dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas 23 luglio 2008 n.99 e s.m.i.

Gli aerogeneratori forniscono energia elettrica in bassa tensione (690V) e sono pertanto dotati di un trasformatore MT/BT ciascuno, alloggiato all'interno dell'aerogeneratore stesso e in grado di elevare la tensione a quella della rete del parco. La rete del parco è costituita da un cavidotto interrato in media tensione (30kV), tramite il quale l'energia elettrica viene convogliata dagli aerogeneratori alla sottostazione elettrica (SSE) di trasformazione AT/MT di proprietà del proponente che sarà collegata in antenna ad una nuova stazione elettrica (SE) di smistamento a 380/150/36 kV della RTN, da inserirsi in modalità entra-esce sulla linea a 380 kV "Ittiri-Selargius" (nel seguito "nuova SE").

Le opere progettuali sono quindi sintetizzate nel seguente elenco:

- parco eolico composto da 9 aerogeneratori, da 6 MW ciascuno, con torre di altezza fino a 125 m e diametro del rotore fino a 170 m, e dalle relative opere civili connesse quali strade di accesso, piazzole e fondazioni;
- impianto di rete, consistente in una nuova SE di smistamento a 380/150/36 kV della RTN da inserirsi in modalità entra-esce sulla futura linea a 380 kV "Ittiri-Selargius" denominata "Furtei 380";
- impianto di utenza per la connessione alla RTN, consistente nella rete di terra, nella rete di comunicazione in fibra ottica, nel cavidotto in media tensione (30kV) interamente interrato e sviluppato principalmente sotto strade esistenti, nella SSE di trasformazione 150/30 kV di proprietà del Proponente e nell'elettrodotto a 150 kV di collegamento tra la SSE e la nuova SE.

I progetti del tipo in esame rispondono a finalità di interesse pubblico (riduzione dei gas ad effetto serra, risparmio di fonti fossili scarse ed importate) ed in quanto tali sono indifferibili ed urgenti, come stabilito dalla legge 1° giugno 2002, n. 120, concernente "Ratifica ed esecuzione del Protocollo di Kyoto alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, fatto a Kyoto l'11 dicembre 1997" e dal D.Lgs. 29 dicembre 2003, n.387 "Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità" e s.m.i..

L'utilizzo di fonti rinnovabili comporta infatti beneficio a livello ambientale, in termini di tonnellate equivalenti di petrolio (TEP) risparmiate e mancate emissioni di gas serra, polveri e inquinanti. Per il progetto in esame si stima una producibilità del parco eolico superiore a 176 GWh/anno, che consente di risparmiare almeno 32'970 TEP/anno (*fonte ARERA: 0,187 TEP/MWh*) e di evitare almeno 87'000 ton/anno di emissioni di CO<sub>2</sub> (*fonte ISPRA, 2020: 493,80 gCO<sub>2</sub>/kWh*).

## 2 Scopo

Scopo del presente documento è analizzare gli effetti in caso di rottura degli organi rotanti per il parco eolico "Pizzu Boi", che la società Sorgenia Renewables Srl propone di realizzare in agro dei comuni di Selegas e Guamaggiore (SU), definendo la distanza che una pala del generatore raggiungerebbe in caso di distacco dal mozzo durante il funzionamento della macchina.

Per l'individuazione di tale distanza si fa riferimento alla teoria dei corpi rigidi che, se applicata all'oggetto che subisce il distacco accidentale, considera la pala del rotore come un insieme di punti materiali le cui reciproche distanze restano invariate durante il moto.

## 3 Proponente

Il soggetto proponente del progetto in esame è Sorgenia Renewables 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 Sorgenia Renewables 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.

## 4 Struttura e ipotesi dell'analisi

L'obiettivo del presente studio è valutare la distanza che una pala raggiungerebbe per il distacco dal mozzo e verificare gli effetti che tale evento potrebbe generare su eventuali recettori.

Allo scopo si è utilizzato come aerogeneratore di riferimento il modello SG170 della Siemens Gamesa, avente le caratteristiche indicate in Tabella 4.4-1

**Tabella 4.4-1–Caratteristiche dell'aerogeneratore di riferimento**

<b>Produttore</b>		<b>Siemens Gamesa</b>
<b>Modello</b>		<b>SG 170</b>
Potenza	kW	6000
Velocità di rotazione nominale	rpm	8.8
Numero di pale	n°	3
Altezza della torre	m	125
Diametro del rotore	m	170

Lunghezza della pala	m	83.5
Classe	IEC	IEC IIIA/IIIB

È opportuno evidenziare come per gli aerogeneratori considerati siano previsti dei sistemi di sicurezza volti a garantire il normale funzionamento e la sicurezza pubblica.

È altresì utile sottolineare come storicamente si siano verificati pochi danni causati dalla rottura accidentale delle pale, questo può essere infatti considerato un evento raro grazie alla tecnologia costruttiva e ai materiali impiegati per la realizzazione delle stesse pale.

Le pale degli aerogeneratori di riferimento nel progetto sono realizzate in fibra di vetro rinforzato con materiali plastici quali fibre epossidiche, tali materiali permettono di limitare fortemente la probabilità di distacco. Anche in caso di rottura le fibre che compongono la pala la mantengono di fatto unita, e i sistemi di sicurezza e controllo riducono la velocità di rotazione tempestivamente.

Per stimare la gittata di una pala distaccatasi da un aerogeneratore è possibile ipotizzare tre differenti condizioni di moto:

1. Presenza delle forze di inerzia ed esclusione delle forze viscosse
2. Presenza delle forze di inerzia e delle forze viscosse
3. Valutazione del moto completo della pala (considerando oltre alle caratteristiche aerodinamiche le condizioni iniziali, quali rollio, imbardata e beccheggio della pala)

Tra le tre condizioni, la prima risulta essere quella che dà luogo alla massima gittata e quindi la più cautelativa. Questa condizione non tiene conto delle forze di resistenza che si esercitano sulla pala (attrito) e porta ad una sovrastima di circa il 20% rispetto ai valori che si otterrebbero considerando anche l'attrito e quindi in condizioni semi-reali.

Le stime riportate nei successivi paragrafi terranno quindi conto della condizione di moto maggiormente cautelativa, con la presenza delle forze inerziali e l'assenza di forze viscosse.

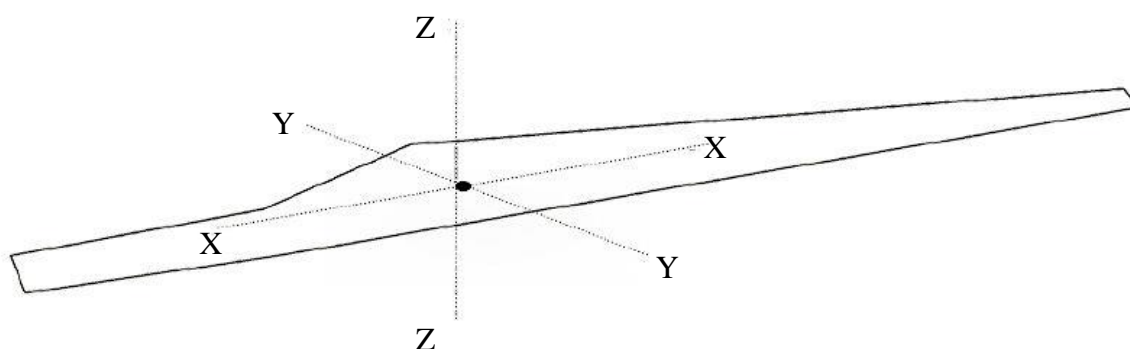
Si sottolinea che l'ipotesi di distacco dell'intera pala è ragionevole, in quanto esiste un punto di discontinuità presso l'attacco bullonato che unisce la pala al mozzo e quindi l'ipotesi di un cedimento di tale attacco, seppur remota, non è da escludere.

Ipotizzare invece il distacco di frammenti della pala o porzioni di guscio comporterebbe invece l'assunzione di ipotesi arbitrarie sulla tipologia del pezzo di pala che si distacca e sulle sue dimensioni. Inoltre, il distacco di frammenti non è imputabile alla presenza di discontinuità, difetti di progettazione o di realizzazione della pala, ma è quasi esclusivamente legato a fulminazioni di natura atmosferica, rendendo la probabilità di accadimento ancora minore rispetto al caso di distacco dell'intera pala data la presenza di un apposito sistema di protezione antifulmine.

Nelle analisi sotto illustrate, si è considerata una velocità di rotazione degli aerogeneratori pari al valore massimo (10,6 rpm). Questa assunzione rende l'approccio estremamente cautelativo in quanto è la velocità nominale (8,8 rpm) quella a cui l'aerogeneratore opera per più tempo, e quindi lo scenario più probabile. Il funzionamento a velocità massima è assai meno probabile.

## 5 Forze agenti sulla traiettoria della pala

La traiettoria iniziale che assume la pala al momento del distacco è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze inerziali che agiscono sulla stessa, che includono oltre all'impulso, i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise. La pala quindi, per la conservazione della quantità di moto, manterrà la sua rotazione all'inizio del moto derivante dal distacco dal rotore, subendo come forza inerziale dominante la forza di gravità. La velocità verticale al momento di distacco iniziale determinerà la durata del volo. Utilizzando tale tempo e la velocità orizzontale al momento iniziale è possibile calcolare la distanza orizzontale percorsa (gittata).



**Figura 5-1 – Sistema di coordinate usato per la pala (YY – flapwise, XX – pitchwise, ZZ edgewise)**

Nell'analisi condotta le forze inerziali sono modellate considerando cautelativamente un regime di moto irrotazionale e stazionario.

Il moto irrotazionale è caratterizzato dall'assenza di rotazione: ne deriva quindi un'assenza di moto intorno agli assi XX, YY e ZZ. In questo caso l'asse XX viene ipotizzato allineato con la traiettoria, mentre l'asse YY giace sul piano verticale. Con questa ipotesi il caso modellizzato si trova nella condizione ideale di massima gittata.

Si sottolinea che, nel caso di moto rotazionale complesso (che più si avvicina al caso di reale traiettoria), si dovrebbe tenere in considerazione il movimento di rotazione della pala distaccata intorno agli assi XX, YY, ZZ. La rotazione intorno all'asse ZZ è dovuta alla conservazione del momento della quantità di moto, mentre le rotazioni XX e YY sono dovute all'incidenza del vento sulla pala distaccata. Queste ultime generano forze resistenti al moto, causando una riduzione della gittata massima fino al 20% del valore, calcolato con ipotesi di moto irrotazionale.

## 6 Modello di calcolo

In accordo con quanto riportato al paragrafo precedente, lo studio della gittata è riconducibile allo studio del regime di moto parabolico bidimensionale. Il sistema di riferimento considerato è di tipo cartesiano "xy" con origine degli assi coincidente al centro della base dell'aerogeneratore.

A partire dalla velocità di rotazione  $\omega$  viene calcolata la velocità tangenziale al baricentro della pala, ipotizzato a 1/3 della sua lunghezza. Tale velocità viene valutata lungo le direzioni X e Y, sulla base dell'angolo  $\alpha$  definito tra l'asse orizzontale X e l'asse della pala al momento di rottura.

$$V_0 = \frac{1}{3} \cdot r_{pala} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega}{60}$$

$$V_{0x} = V_0 \cdot \cos(\alpha)$$

$$V_{0y} = V_0 \cdot \sin(\alpha)$$

Considerando momentaneamente la sola componente verticale è possibile calcolare il tempo di volo, dalla relazione:

$$h_{suolo} = h_{pala} + V_{0y} \cdot t_{volo} - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_{volo}^2$$

dove l'altezza al suolo ( $h_{suolo}$ ) viene considerata pari a 0, ovvero alla stessa quota dell'origine del sistema di riferimento, e  $g$  è l'accelerazione di gravità pari a  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Invertendo tale relazione si ricava il tempo di volo ( $t_{volo}$ ).

Una volta ottenuto il valore di tempo di volo ( $t_{volo}$ ), è possibile calcolare la distanza percorsa dalla pala in volo lungo la direzione orizzontale X.

$$D_x = V_{0x} \cdot t_{volo}$$

La distanza (G) a cui cade il baricentro della pala è data quindi dalla posizione della pala al momento del distacco sommata alla distanza percorsa.

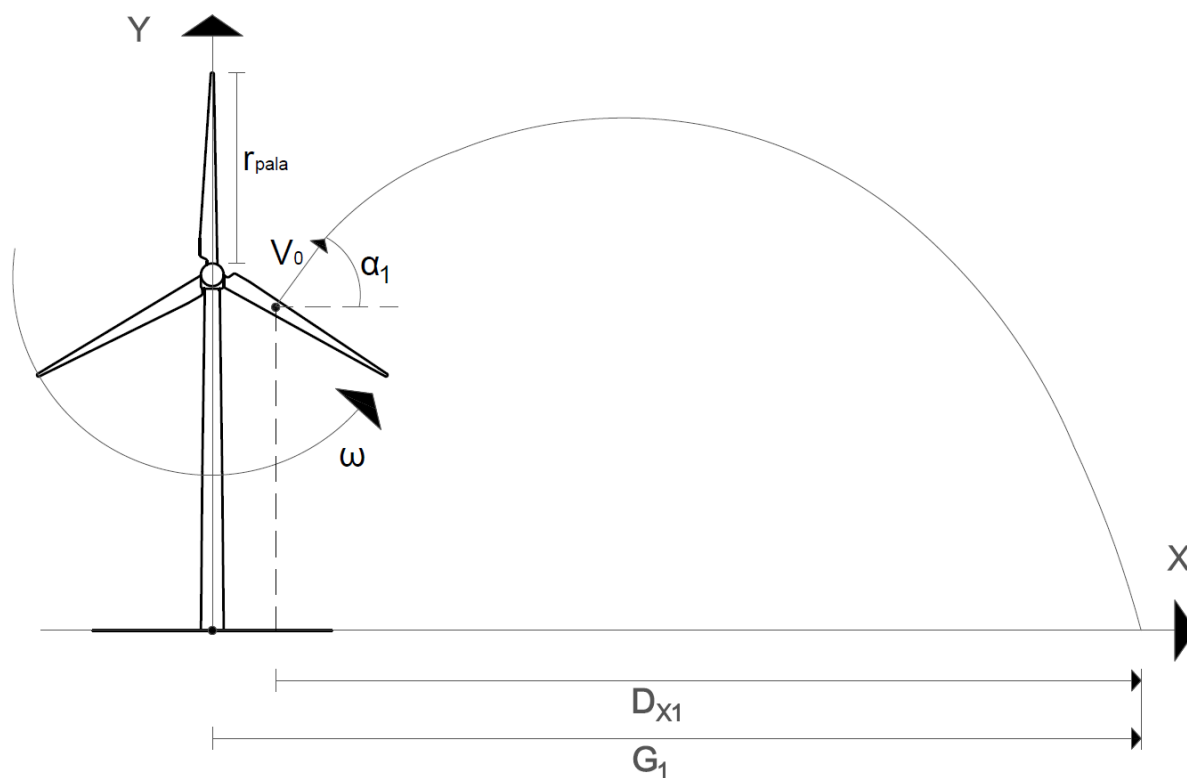
$$G = D_{0x} + D_x$$

dove  $D_{0x}$  è calcolato come lo scostamento del baricentro in direzione X, rispetto all'origine del sistema di riferimento.

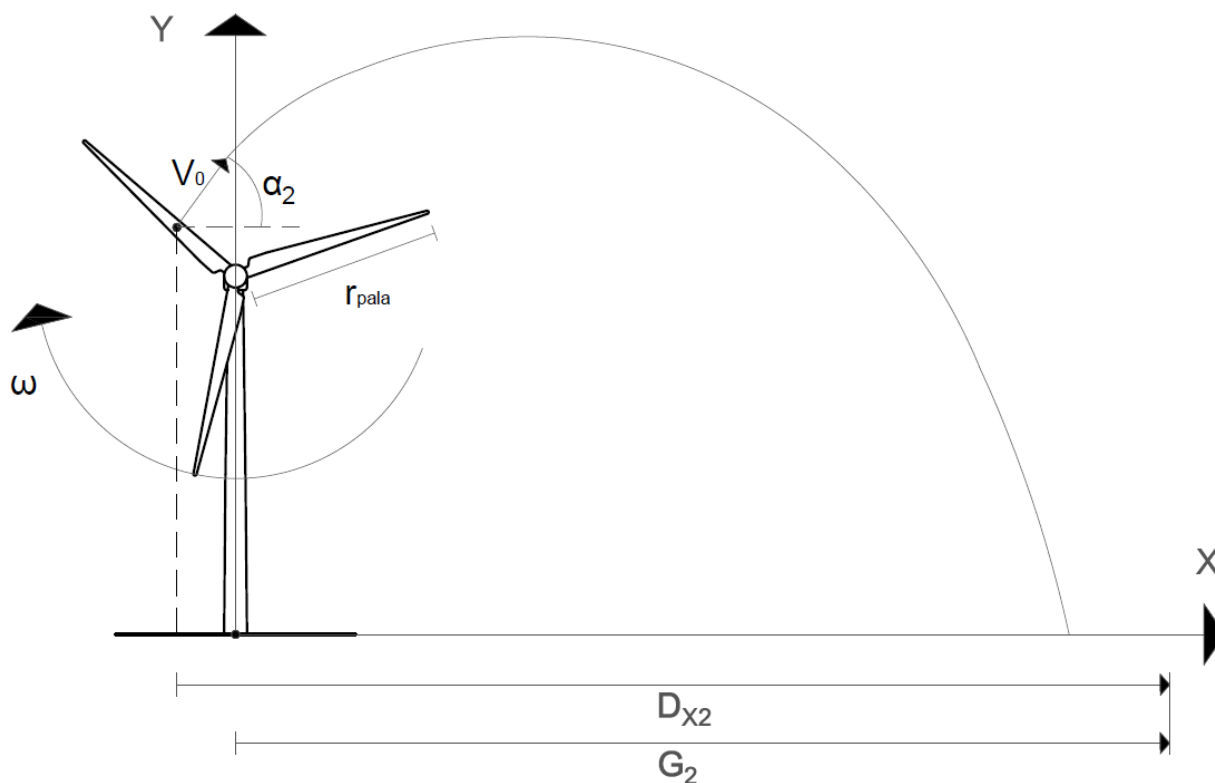
La gittata massima della pala ( $G_{max}$ ) risulta dunque pari alla somma di G e la distanza tra il baricentro e l'estremità della pala.

$$G_{max} = G + \frac{2}{3} \cdot r_p$$

Come evidente nelle formule sopra indicate, la gittata è dipendente dal valore dell'angolo  $\alpha$ , ovvero dalla posizione della pala al momento del distacco. A tal proposito il modello di calcolo utilizzato, valuta iterativamente l'angolo di  $\alpha$ , determinandone il valore per il quale si ottiene la gittata massima.



**Figura 6-1 – Rappresentazione grafica della gittata in caso di  $D_x < G$  (Caso 1)**



**Figura 6-2 – Rappresentazione grafica della gittata in caso di  $D_x > G$  (Caso 2)**



## 7 Conclusioni

I risultati dell'analisi descritta ai precedenti paragrafi sono riportati nelle tabelle seguenti.

**Tabella 7.7-1 – Risultati del calcolo della gittata sotto l'ipotesi di moto irrotazionale, caso n.1**

Caso 1 – moto irrotazionale $D_{x1} < G_1$					
$\omega$	$V_0$	$\alpha_1$	$t_{\text{volo}}$	$D_{x1}$	$G_1$
[rpm]	[m/s]	[deg]	[s]	[m]	[m]
10,6	32,6	35	6,8	198,8	254,5

**Tabella 7.7-2 – Risultati del calcolo della gittata sotto l'ipotesi di moto irrotazionale, caso n.2**

Caso 2 –moto irrotazionale $D_{x2} > G_2$					
$\omega$	$V_0$	$\alpha_2$	$t_{\text{volo}}$	$D_{x2}$	$G_2$
[rpm]	[m/s]	[deg]	[s]	[m]	[m]
10,6	32,6	20	6,8	198,8	254,5

Si stima dunque che la distanza massima che una pala raggiungerebbe in caso di distacco dal mozzo è pari a 254,5 m.

Nel modellato sono state fatte le seguenti assunzioni, tutte di carattere conservativo:

- Distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- Assenza di attriti viscosi durante il volo;
- Distacco alla rotazione di funzionamento massima;
- Assenza di dissipazione del moto per rotazione.

Tutte queste assunzioni assieme fanno sì che il valore calcolato sia estremamente cautelativo e possono portare a una sovrastima della gittata superiore al 20%.

All'interno del cerchio con raggio pari al valore di gittata stimato (254,5 m) e centro nella posizione di ciascun aerogeneratore, non sono presenti abitazioni o fabbricati di qualsivoglia destinazione d'uso, come si evince dalle seguenti figure. L'unica eccezione in corrispondenza dell'aerogeneratore GU1 è data dalla presenza di un fabbricato (F21) di categoria C2.

## 7.1 Analisi dei ricettori

Nelle seguenti figura sono illustrate le aree di gittata degli aerogeneratori sovrapposte ai fabbricati presenti nel sito di progetto. Quest'ultimi sono identificabili per mezzo di un numero progressivo, e di un segnaposto di colore:

- verde per i ricettori non sensibili (fabbricati diruti, magazzini, ecc)
- rosso per i ricettori sensibili (abitazioni, scuole, ecc).



Figura 7-1 – Gittata dell'intera pala (254,5 m) in colore giallo, da aerogeneratore S2



**Figura 7-2 – Gittata dell'intera pala (254,5 m) in colore giallo, da aerogeneratore S3**



**Figura 7-3 – Gittata dell'intera pala (254,5 m) in colore giallo, da aerogeneratore S4**



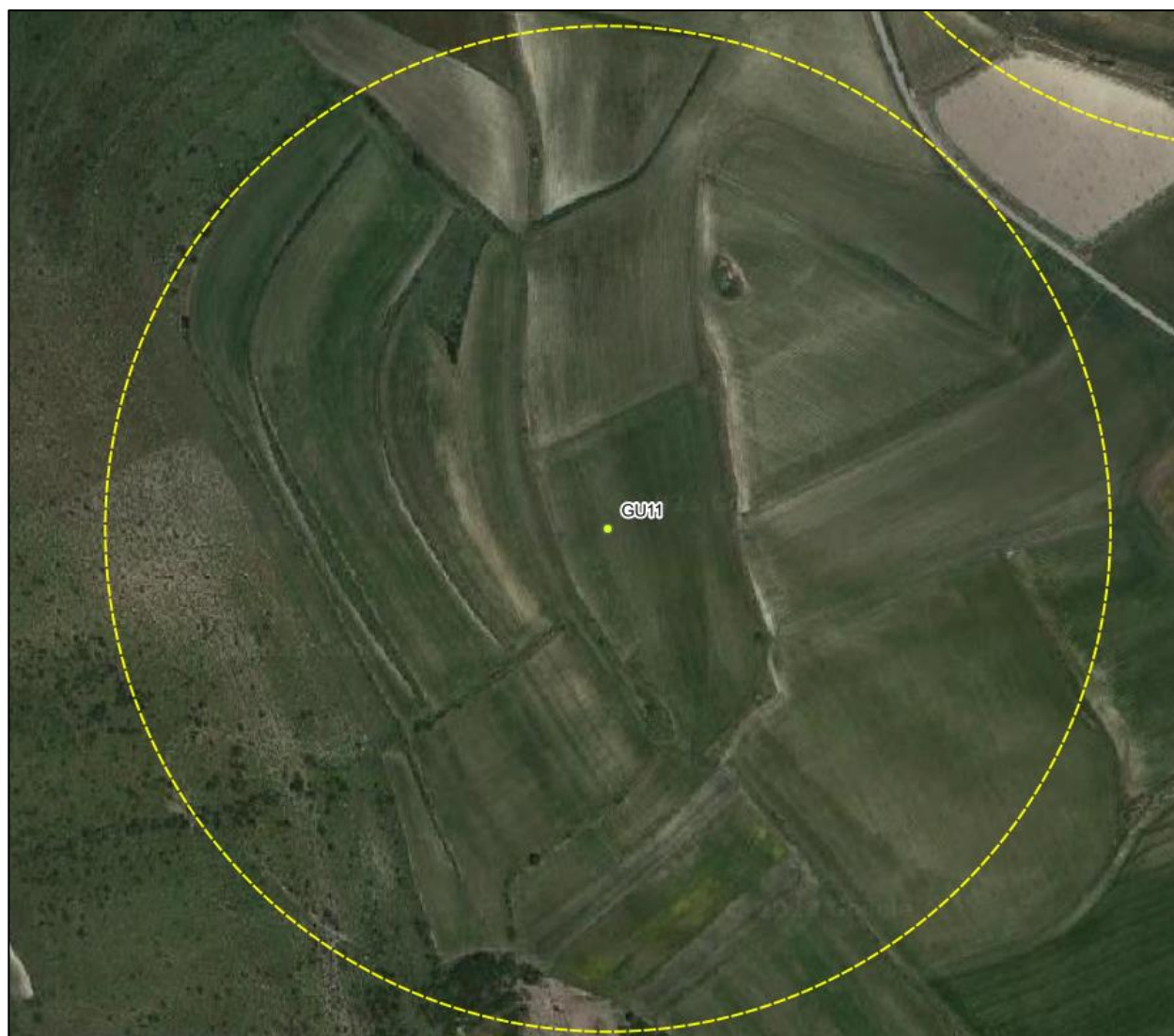
**Figura 7-4 – Gittata dell'intera pala (254,5 m) in colore giallo, da aerogeneratore GU1**

**Tabella 7.3 – Scheda fabbricato F21**

	<p><b>Fabbricato F14</b></p> <p>Comune di Selegas</p> <p>Foglio 9, Particella 101</p> <p>Categoria C/02:</p> <p><i>"Magazzini e locali di deposito"</i></p>
--	---



**Figura 7-5 – Gittata dell'intera pala (254,5 m) in colore giallo, da aerogeneratore GU10**



**Figura 7-6 – Gittata dell'intera pala (254,5 m) in colore giallo, da aerogeneratore GU11**



**Figura 7-7 – Gittata dell'intera pala (254,5 m) in colore giallo, da aerogeneratore GU12**





**Figura 7-8 – Gittata dell'intera pala (254,5 m) in colore giallo, da aerogeneratore GU13**



**Figura 7-9 – Gittata dell'intera pala (254,5 m) in colore giallo, da aerogeneratore GU14**