

COMUNE di FOGGIA

**Progetto definitivo
per la realizzazione
di un Parco Eolico
progetto " Stella "**

COMMITTENTE

DESE S.r.l.

**PROGETTO
DEFINITIVO**

COMUNE: **FOGGIA** LOCALITA': **"Stella - Vulgano"**

Calcolo gittata

Scala:

-

Data:

29-02-2024

Rev:

00

Codifica:

DL/FG/PTO/EL_GI

ELABORATO

GI

Progettazione:

SISTEMI ENERGETICI
S.p.A.

Via Mario Forcella, 14 - 71121 FOGGIA

Tecnico incaricato:



Ing. Marcello Salvatori

INDICE

1. GITTATA MASSIMA DELLA PALA IN CASO DI ROTTURA ACCIDENTALE	Pag.2
1.1 Introduzione	Pag.2
1.2 Metodologia ed ipotesi	Pag.2
1.3 Forze agenti sulla traiettoria pala	Pag.2
1.4 Esperienze e note statistiche	Pag.3
1.4.1 <i>Distacco di una delle pale dal rotore</i>	<i>Pag.3</i>
1.4.2 <i>Rottura (apertura) dell'estremità di pala</i>	<i>Pag.3</i>
2. ANALISI DEL RISCHIO ASSOCIATO ALLA ROTTURA ACCIDENTALE DI PALA INTERA	Pag.5
2.1 Metodo di Calcolo	Pag.5
2.2 Valori di gittata massima	Pag.8
3. ANALISI DEL RISCHIO ASSOCIATO ALLA ROTTURA ACCIDENTALE DI FRAMMENTI DI PALE	Pag.8
3.1 Base di calcolo	Pag.8
3.2 Valori di gittata massima del frammento di pala	Pag.10
4. ANALISI E SCELTA DEI RICETTORI SENSIBILI PRESENTI NELL'AREA DI IMPIANTO	Pag.11
4.1 Fabbricati	Pag.11
4.2 Viabilità	Pag.11
5. VERIFICA DI IMPATTO DELLA GITTATA MASSIMA	Pag.11
5.1 Fabbricati	Pag.11
5.2 Strade	Pag.11

1. GITTATA MASSIMA DELLA PALA IN CASO DI ROTTURA ACCIDENTALE

1.1 Introduzione

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore in caso di rottura, calcolo eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare danno a cose e/o persone.

Premesso che al momento della stesura del presente studio l'aerogeneratore proposto non è ancora in stato definito, infatti nella proposta del progetto definitivo si chiede di valutare un impianto composto da n. 7 aerogeneratori aventi una potenza unitaria di 4,5MW, per una potenza complessiva di 31,5MW, con altezza del mozzo di 100 metri, diametro del rotore dagli 156 mt. Per il calcolo della gittata massima di una pala sono stati calibrati ipotizzando le condizioni peggiori ossia un aerogeneratore che abbia un numero di giri massimo nella condizione di vento massimo (14.5 g/m) che siano del tipo SINOVEL SL156, avente come lunghezza della pala **78 metri** e ci si è posti nell'ipotesi di distacco della stessa nel punto di attacco sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per evidente effetto di intaglio dovuto al collegamento.

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo in esame, sono le più gravose possibili, in modo da trovarci nella situazione maggiormente cautelativa.

1.2 Metodologia ed ipotesi

Da un punto di vista teorico, se non si considerano le forze aerodinamiche la massima gittata si ottiene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 45° (135° in posizione azimutale).

Le forze di resistenza che agiscono sulla pala in realtà rendono minore il tempo di volo e quindi la gittata.

Il moto reale è molto più complesso, in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala).

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

- Altezza della torre $H = 100$ m;
- Diametro del rotore $D = 156$ m , quindi lunghezza della pala 78 m circa;
- Velocità di rotazione massima del rotore $V = 14,5$ giri/min.

1.3 Forze agenti sulla traiettoria pala

Le ipotesi fatte in questo studio considerano il caso peggiore, esso avviene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 45° sul piano verticale (cioè 135° azimuth).

La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala a causa di una rottura istantanea, durante il moto rotatorio, è molto complessa. La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala. Queste includono anche, per esempio, oltre all'impulso anche i momenti di *flapwise*, *edgewise* e *pitchwise* agenti al momento del distacco. La pala, quindi, quando inizierà il suo moto continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità. La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano.

La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco iniziale. Le forze inerziali sono modellate considerando un flusso *irrotazionale e stazionario*.

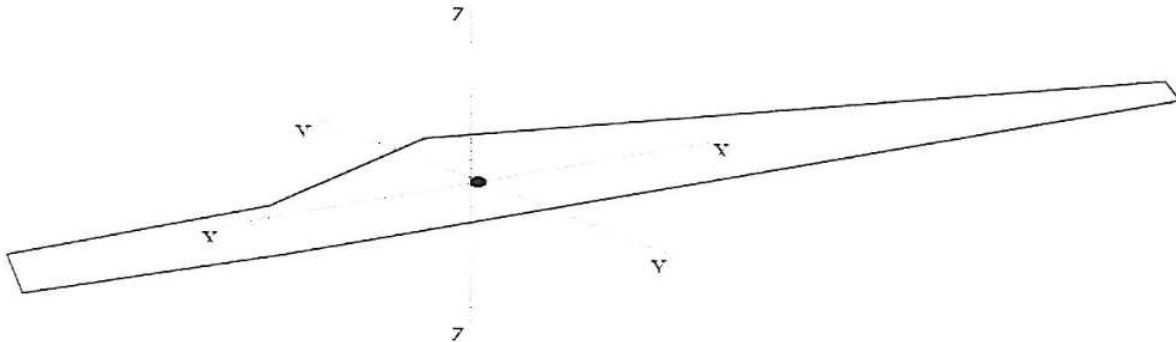


Figura 1 - SISTEMA DI COORDINATE USATO PER LA PALA (YY -- Flapwise, XX - Pitchwise. ZZ - Edgewise)

1.4 Esperienze e note statistiche

E' necessario enfatizzare che dal punto di vista progettuale la combinazione di coefficienti di sicurezza per i carichi, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettano quanto prescritto dalla norma IEC61400-1. In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate "fail safe".

Questo paragrafo è stato redatto al fine di presentare alcuni degli elementi fondamentali per poter valutare la reale possibilità del distacco di una pala, o di frammenti di questa, dagli aerogeneratori.

L'esperienza pratica ha mostrato che in caso di distacco di pala o parti di essa il moto è stato di tipo "rotazionale complesso" e le distanze raggiunte sono normalmente risultate inferiori a quelle stimate con i calcoli semplificati qui riportati.

Frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, per la maggior parte staccatisi a causa di azioni esterne (tipica la fulminazione atmosferica) o imperizia umana, sono stati ritrovati a non più di 40-50 m dalla base dell'aerogeneratore.

Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi vengono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente.

1.4.1 Distacco di una delle pale dal rotore

Questo tipo di incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo.

In occasione di tali tipi di evento, la pala ha raggiunto il terreno ad una distanza inferiore ai cento metri. Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

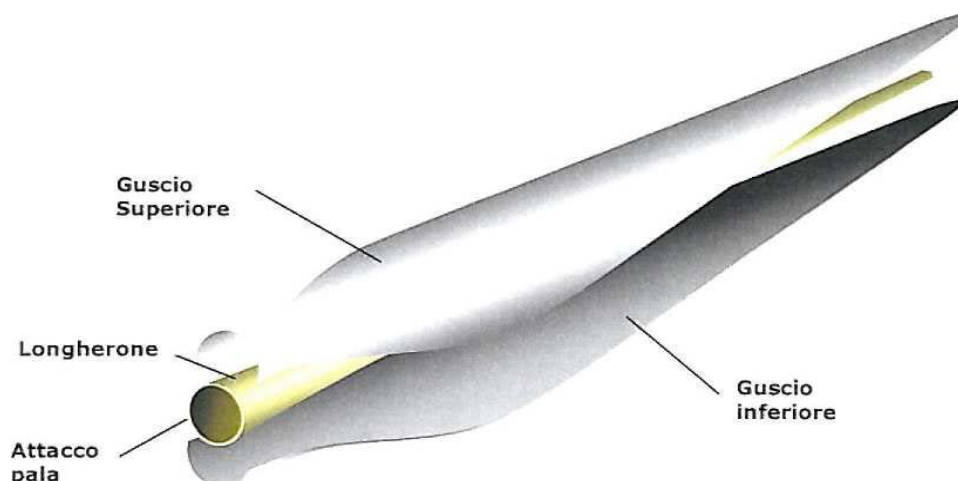


Figura 2 – Componenti di una pala

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'evento si è manifestato a causa di incorretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore. Per cui l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.

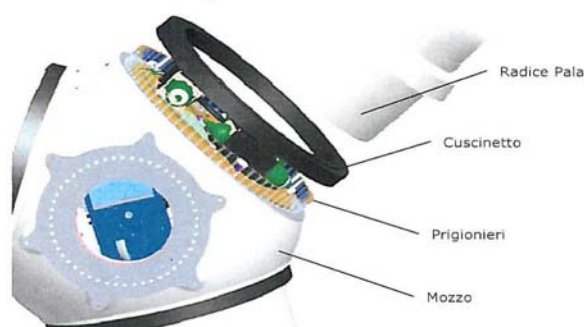


Figura 3 – Componenti del rotore

1.4.2 Rottura (apertura) dell'estremità di pala

Questo tipo di incidente si è quasi sempre manifestato in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

Tutte le pale prodotte sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra, In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che

si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. E' possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.

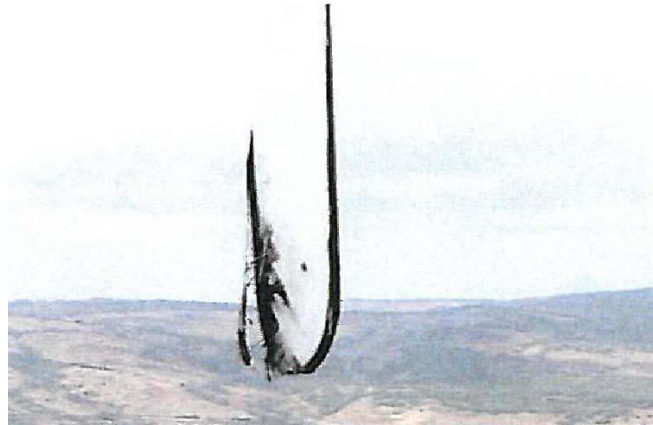


Figura 4 - Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica

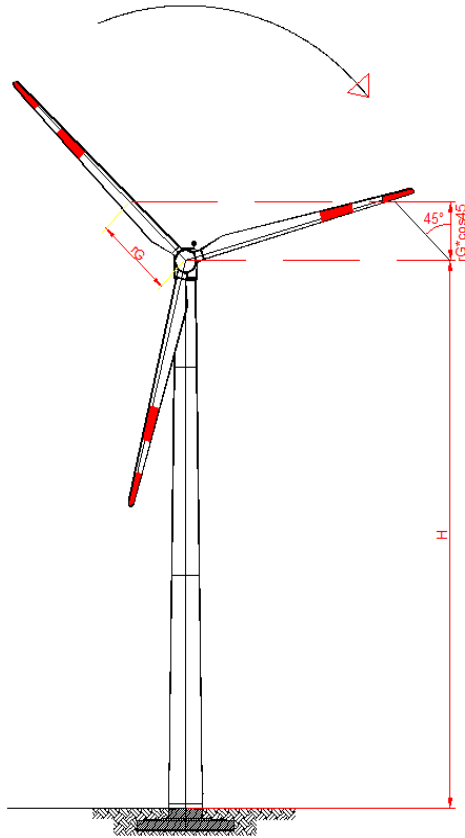
2. ANALISI DEL RISCHIO ASSOCIATO ALLA ROTTURA ACCIDENTALE DI PALA INTERA

2.1 Metodo di Calcolo

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

rG = raggio del baricentro

VG = velocità periferica del baricentro



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

2.1.1 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:

Tipo WTG	Baricentro rG
SINOVEL SL156 4,5MW hh=100	26m

2.1.2 Calcolo della velocità periferica.

Il dato di partenza è $n = 14,5$ giri/min che corrisponde ad una velocità angolare

$$\omega = 2\pi n / 60 = 1.51 \text{ rad/s}$$

La legge con cui varia la velocità periferica, ossia il dato che utilizzeremo per il calcolo, ha un andamento che varia linearmente lungo il profilo della pala con il raggio.

Per cui la velocità del baricentro sarà pari a $VG = 39,45 \text{ m/s}$, ossia $\omega \times rG$.

2.1.3. La legge del moto

Supponiamo di trovarci nel caso notevole di un proiettile non puntiforme.

Le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$1) \quad Mg = Ma_G$$

$$2) \quad 0 = I \frac{d\omega}{dt}$$

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.

Per calcolare l'equazione della traiettoria, bisogna proiettare le caratteristiche dinamiche sui tre assi, integrarle tenendo conto delle condizioni iniziali (velocità del baricentro al momento del distacco) e con facili calcoli giungere al valore della gittata espresso dalla seguente:

$$G_{\max} = \frac{V_G^2}{g} \sin 45^\circ \cdot \cos 45^\circ \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{2gh_G}{V_G^2 \sin^2 45^\circ}} \right)$$

2.1.4 Calcolo di hG

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato nell'ipotesi in cui il distacco avvenga, come anzidetto nelle condizioni più gravose, cioè a 45° rispetto alla verticale.

Il valore di **hG** è pari all'altezza dell'intera torre meno il valore della proiezione di **rG** sulla verticale ossia:

$$hg = H + (rG * \cos 45^\circ) = 118,382 \text{ m}$$

Dove H è l'altezza della torre.

2.2. Valore di gittata massima

Dai calcoli suddetti, e scegliendo ovviamente il risultato che ha senso fisicamente (il segno +) avremo i seguenti valori:

Angolo di rottura	Gittata max Pala
Angolo a 45°	285,01

Questo rappresenta il valore della gittata nelle condizioni più gravose, ossia rappresenta la distanza alla quale cade il baricentro della pala, a partire dalla base della torre. Nota la posizione di quest'ultimo, date le caratteristiche geometriche della pala precedentemente valutate, si può calcolare il punto in cui cade il vertice della pala stessa. Considerando l'ipotesi più pericolosa, **ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro (la punta) verso l'esterno, si ottengono i valori massimi di cui sopra.**

3. ANALISI DEL RISCHIO ASSOCIATO ALLA ROTTURA ACCIDENTALE DI FRAMMENTI DI PALE

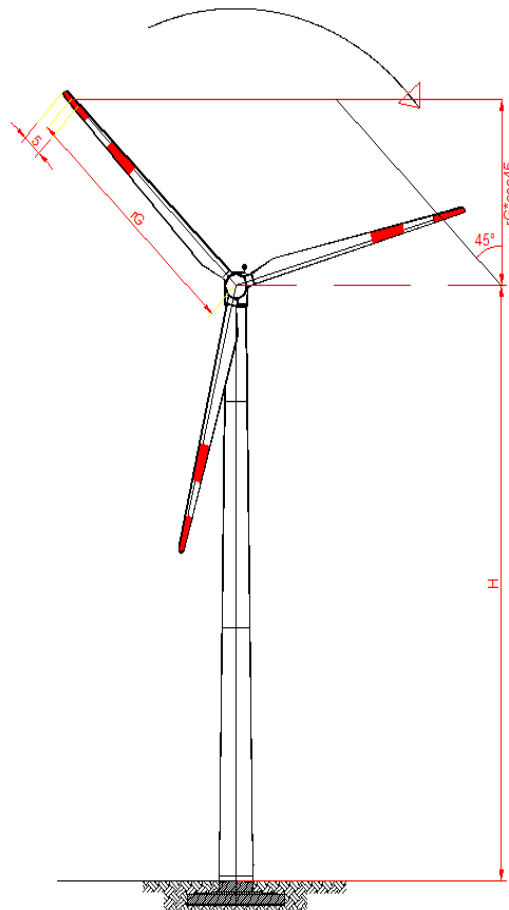
3.1 Base di calcolo

Lo schema adottato per il calcolo è il seguente:

Dimensione del frammento mt 5 della parte terminale in cui il baricentro G è ipotizzato alla mezzeria del frammento visto che la forma della pala in terminale si può approssimare ad un rettangolo. Quindi nel sistema avremo:

rG = raggio del baricentro

VG = velocità periferica del baricentro



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

3.1.1 Calcolo del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerato che la parte terminale risulta approssimabile ad un rettangolo, possiamo ritenere con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato alla mezzeria rispetto alla lunghezza del frammento, cioè

Tipo WTG	Baricentro rG
SINOVEL V156 4,5MW hh=100	73m

3.1.2 Calcolo della velocità periferica.

Il dato di partenza è $n = 14,5$ giri/min che corrisponde ad una velocità angolare

$$\omega = 2\pi n/60 = 1.51 \text{ rad/s}$$

La legge con cui varia la velocità periferica, ossia il dato che utilizzeremo per il calcolo, ha un andamento che varia linearmente lungo il profilo della pala con il raggio.

Per cui la velocità del baricentro sarà pari a **VG = 110,78 m/s, ossia $\omega \times rG$.**

3.1.3. La legge del moto

Supponiamo di trovarci nel caso notevole di un proiettile non puntiforme.

Le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$1) \quad Mg = Ma_G$$

$$2) \quad 0 = I \frac{d\omega}{dt}$$

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.

Per calcolare l'equazione della traiettoria, bisogna proiettare le caratteristiche dinamiche sui tre assi, integrarle tenendo conto delle condizioni iniziali (velocità del baricentro al momento del distacco) e con facili calcoli giungere al valore della gittata espresso dalla seguente:

$$G_{\max} = \frac{V_G^2}{g} \sin 45^\circ \cdot \cos 45^\circ \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{2gh_G}{V_G^2 \sin^2 45^\circ}} \right)$$

3.1.4 Calcolo di hG

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato nell'ipotesi in cui il distacco avvenga, come anzidetto nelle condizioni più gravose, cioè a 45° rispetto alla verticale.

Il valore di hG è pari all'altezza dell'intera torre meno il valore della proiezione di rG sulla verticale ossia:

$$hg = H + (r_G \cdot \cos 45^\circ) = 156,61 \text{ m}$$

Dove H è l'altezza della torre.

3.2 Valori di gittata massima del frammento di pala

Dai calcoli suddetti, e scegliendo ovviamente il risultato che ha senso fisicamente (il segno +) avremo i seguenti valori, e considerando che il valore reale, ossia quello calcolato tenendo conto

della resistenza dell'aria sia inferiore, si può prevedere un abbattimento al 30% per assumere i seguenti valori:

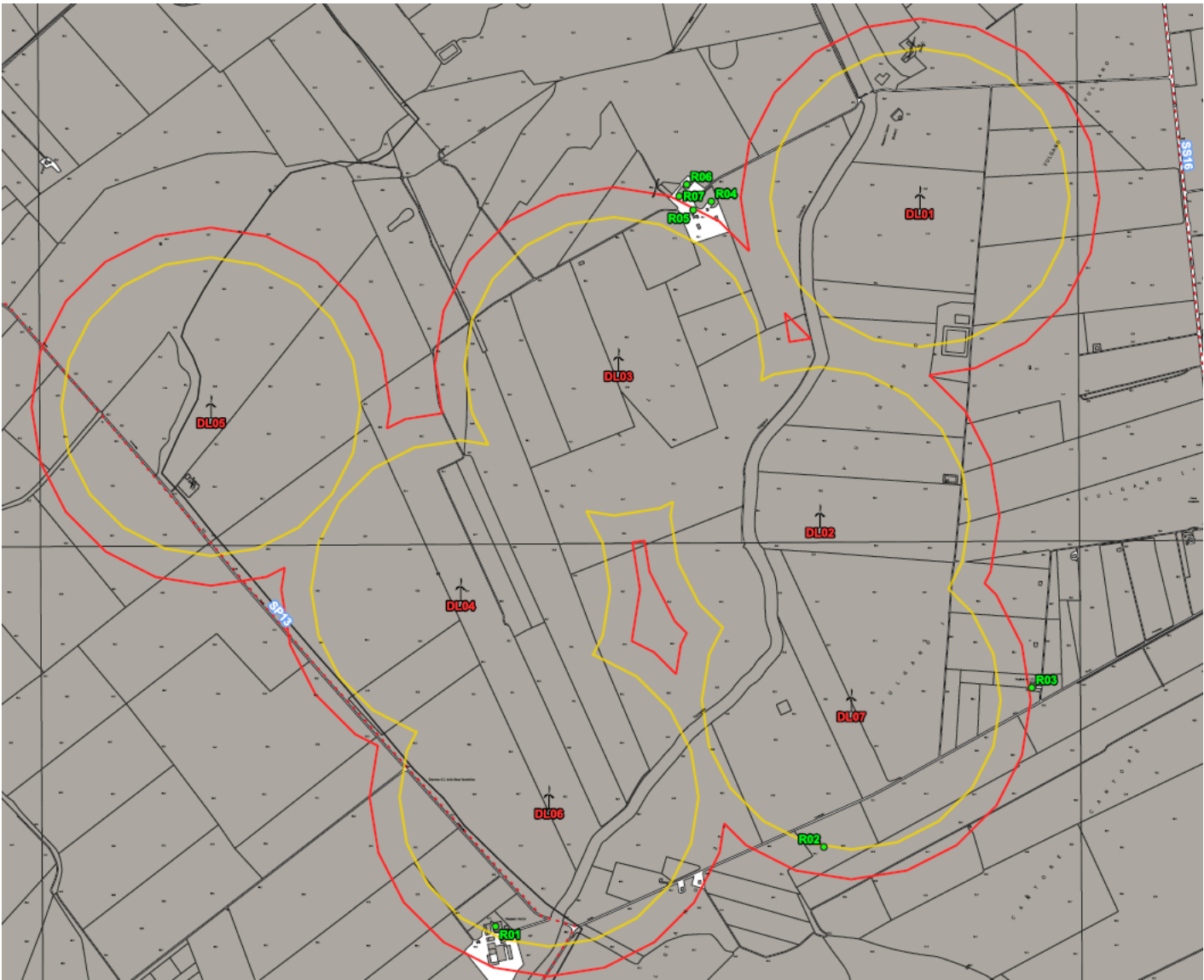
Angolo di rottura	Gittata max Pala
Angolo a 45°	411

Questi rappresentano i valori della gittata nelle condizioni più gravose, ossia rappresentano la distanza alla quale cade il baricentro del frammento di pala, a partire dalla base della torre. Nota la posizione di quest'ultimo, date le caratteristiche geometriche del frammento di pala precedentemente valutate, si può calcolare il punto in cui cade il vertice del frammento stesso. Considerando l'ipotesi più pericolosa, **ossia quella in cui il frammento della pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro (la punta) verso l'esterno, si ottengono i valori massimi di cui sopra.**

4. ANALISI E SCELTA DEI RICETTORI SENSIBILI PRESENTI NELL'AREA DI IMPIANTO

4.1 Fabbricati

In considerazione dei valori di gittata calcolati pari a 285m nel caso di rottura dell'intera pala e pari a 411m nel caso di distacco del frammento di pala, l'individuazione e la scelta dei fabbricati da considerare come ricettori sensibili nella verifica dell'impatto in caso di rottura accidentale della pala e/o frammenti di essa, **è stata effettuata considerando** i potenziali recettori distanti fino a 500 metri dagli aerogeneratori di progetto (vedere aree circoscritte in giallo della seguente planimetria):



Individuazione planimetrica dei ricettori nel buffer di 500 mt

LEGENDA	
Ricettori	●
Strade	---
aerogeneratori	↑
Buffer 500m	□
Buffer 600m	□
Limiti comunali	□
CTR	■

Da tale studio, sono stati evinti n. 7 ricettori contraddistinti nella precedente planimetria da R01, R02, R03, R04, R05, R06, R07. Nella seguente tabella si riportano le distanze aerogeneratore/ricettore, da cui si può dedurre che tutte le distanze sono superiori ai valori calcolati di gittata massima. Quanto verificato garantisce la compatibilità dell'impianto rispetto ai ricettori sensibili.

DISTANZE AEROGENERATORE - RICETTORE [m]

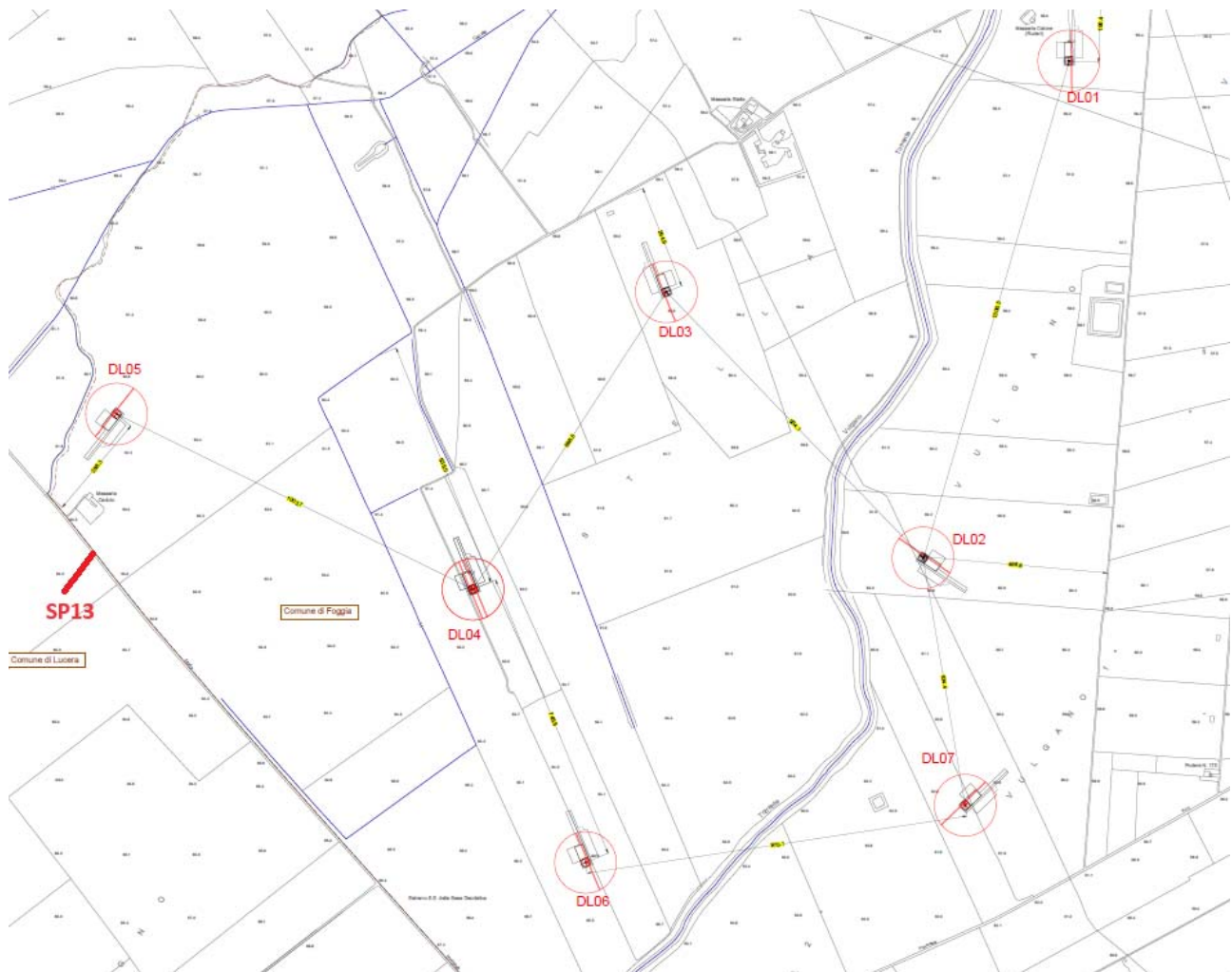
RICETTORI	DL01	DL02	DL03	DL04	DL05	DL06	DL07
R1	2825	1752	1918	1136	1985	468	1411
R2	2199	1108	1756	1490	2525	935	500
R3	1684	913	1755	1939	2903	1657	605
R4	998	1116	642	1547	1810	2070	1736
R5	760	1110	587	1490	1742	2026	1726
R6	782	1198	657	1553	1757	2105	1815
R7	806	1171	610	1506	1717	2061	1785

INDIVIDUAZIONE RICETTORI SU REGISTRO CATASTALE

RICETTORE	COMUNE	X	Y	FOGLIO	PARTICELLA	CATEGORIA
R1	LUCERA	539694	4595757	50	96	A03-D10
R2	FOGGIA	540792	4596024	41	82	A10-D01-D10
R3	FOGGIA	541488	4596557	22	219	A03
R4	FOGGIA	540416	4598187	21	256	A04
R5	FOGGIA	540355	4598158	21	257	D10
R6	FOGGIA	540333	4598244	21	244	A03-D10-F02
R7	FOGGIA	540308	4598204	21	303	D10

4.2 Viabilità

L'analisi della presenza di strade classificate secondo le Linee Guida Nazionali (pubblicate nella G.U. del 18/09/2010) estesa ad un buffer corrispondente alla gittata massima del frammento, ci ha portato ad individuare nella seguente planimetria le seguenti strade:



Viabilità interessata dalla rischio di gittata nell'area dell'impianto.

La strada più prossima ad uno degli aerogeneratori dell'impianto, nel caso specifico l'aerogeneratore DL05 di cui alla figura precedente, è la Strada Provinciale 13 che passa a ovest dello stesso e risulta posta ad circa 270 mt.



Il controllo di compatibilità dell'impianto rispetto alle strade più prossime all'area del parco è stata effettuata verificando la rispondenza delle distanze dell'aerogeneratore dalla viabilità primaria (Autostrade, Strade Statali e Provinciali). Questo controllo ha evidenziato la presenza della strada provinciale SP 13 considerata la più prossima al parco (dista a circa 270 mt dall'aerogeneratore DL05, distanza inferiore rispetto ai 411 mt della gittata calcolata in caso di distacco di frammento di pala). Tuttavia la compatibilità dell'iniziativa con la viabilità in esame risulta comunque verificata in quanto risulta essere esigua la probabilità che si possa verificare l'evento alla luce della limitata frequentazione della suddetta sede viaria.

Foggia. 27/02/2024

Ing. Marcello Salvatori